

# POLITECNICO DI TORINO



Laurea Magistrale Ingegneria Elettrica

## **Valutazione dello stato di efficienza dei passanti alta tensione di trasformatori di potenza e individuazione della strumentazione online più efficiente ed implementabile.**

*Relatore*

*Prof. Ing. Aldo Canova*

*Tutor aziendale*

*Ing. Marco Cerruti*

*Laureando*

*Stefano Palma*

Data 23/03/2020

# Indice

1. Valutazione dello stato di efficienza dei passanti AT .....	4
1.1.Generalità.....	4
1.2.Tipologia e classificazione dei passanti. ....	5
1.3. Diagnostica di un passante alta tensione .....	12
1.4. Montaggio di un isolatore passante.....	15
2. Analisi tecnica .....	17
2.1. Parametri fisici caratterizzanti .....	17
2.2. Scariche parziali nei passanti .....	21
2.2.1. Pattern delle scariche parziali .....	23
2.2.2. Circuito equivalente delle scariche parziali all'interno di una cavità. ....	25
2.3. Limiti di temperatura di un passante AT.....	27
2.3.1. Metodi di studio per il calcolo della distribuzione di temperatura. ....	32
3. Caso pratico.....	35
3.1 Introduzione.....	35
3.2. Azienda1: caratteristiche dei trasformatori e passanti.....	35
3.2.1 Apparecchiatura fornita e installata dall'azienda1.....	39
3.2.2 Acquisizione dati .....	44
3.2.3. Struttura software.....	46
3.3. Azienda2: caratteristiche dei trasformatori e passanti.....	48
3.3.1 Apparecchiatura fornita e installata dall'azienda2.....	50
3.3.2. Acquisizione dati.....	51
3.3.3. Struttura Software .....	52
3.4. Azienda3: caratteristiche dei trasformatori e passanti.....	57
3.4.1. Apparecchiatura fornita e installata. ....	58
3.4.2. Acquisizione dati.....	60
3.4.3. Struttura Software/Hardware. ....	63
4. Confronto e valutazione.....	71
4.1. Introduzione.....	71
4.2 Descrizione grafica e degli elementi caratteristici per azienda.....	72
4.2.1. Azienda1 .....	72
4.2.2. Azienda2.....	77
4.2.3. Azienda3.....	89

Conclusioni .....	97
Bibliografia e sitografia .....	100

# 1. Valutazione dello stato di efficienza dei passanti AT

## 1.1.Generalità

La necessità di collegare gli avvolgimenti in alta tensione di un trasformatore con le linee elettriche in AAT, AT e MT (rispettivamente altissima, alta e media tensione) ha portato allo sviluppo e all'affermazione tecnologica degli isolatori passanti, in inglese bushings. La definizione tecnica di un isolatore passante è indicata dalla norma CEI EN 60137 la quale lo definisce come segue: “Dispositivo che permette ad uno o più conduttori di attraversare una parete, quali muro o una cassa, isolando i conduttori da quest’ultima. Gli attacchi (flangia o dispositivo di fissaggio) sulla parete formano parte dell’isolatore passante”.

Gli isolatori passanti, chiamati spesso bushings, dalla terminologia inglese, rappresentano le strutture di collegamento dei conduttori, ad alti livelli di potenziale, che si trovano in due ambienti differenti. Nella maggior parte dei casi i conduttori nella parte interna sono immersi in un fluido (es: Olio) mentre nella parte esterna sono in aria.

Le normative richiedono la realizzazione di un passante secondo la regola dell’arte. Pertanto, ogni struttura deve soddisfare una serie di requisiti tecnici; garantendo in egual modo le caratteristiche di natura elettrotecnica, fisica, chimica e meccanica.

In figura 1.1 è indicata la struttura generica di un passante per trasformatori ad alta tensione.

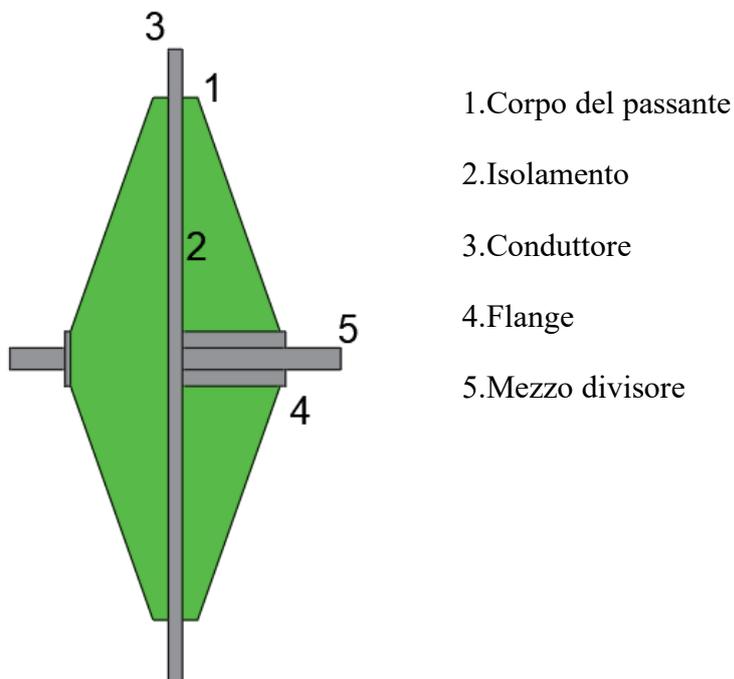


Figura 1.1 Elementi costituenti un passante

Il corpo del passante rappresenta l'involucro esterno ed è costituito, di norma, da materiale ceramico. L'evoluzione tecnologica ha portato allo sviluppo di involucri in resina epossidica (per migliorare le prestazioni meccaniche) e un rivestimento in gomma siliconica per garantire la tenuta agli agenti atmosferici.

## 1.2. Tipologia e classificazione dei passanti.

La classificazione di un isolatore passante avviene attraverso tre macrocategorie:

- Controllo di campo
- Tipologia di isolamento
- Tipologia di conduttore

La classificazione a controllo di campo si distingue a sua volta in:

- Con controllo di campo
- Senza controllo di campo

La prima tecnologia utilizzata per i passanti è stata senza controllo di campo; quest'ultimi permettevano di raggiungere tensioni fino a 132kV. Di seguito, in figura 1.2 è rappresentata la configurazione base di un passante senza controllo di campo.

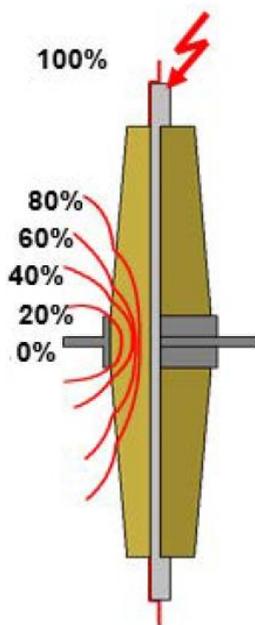


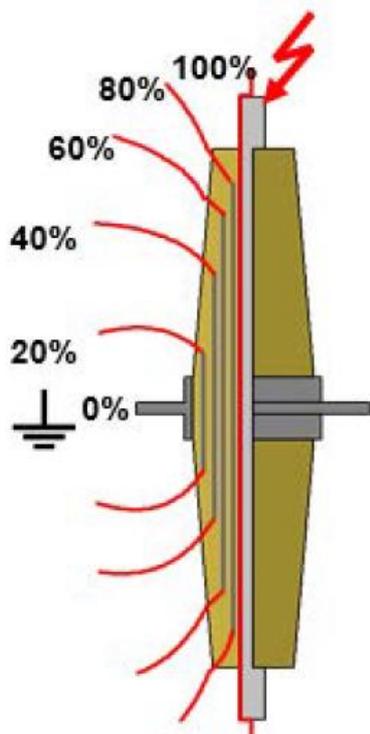
Figura 1.2 Configurazione di un passante senza controllo di campo.

Il corpo che caratterizza la struttura del passante è in porcellana. L'involucro centrale e il conduttore sono separati da un materiale isolante (Olio o resina).

Il problema principale di questa tecnologia è l'elevato campo elettrico che si instaura alla flangia. Maggiori saranno i valori del campo elettrico e più grandi saranno le dimensioni del passante stesso.

Il campo di applicazione per i passanti senza controllo di campo è limitato a tensioni non superiori ai 52kV. Per valori inferiori si preferisce utilizzare questa tecnologia poiché garantisce un ottimo compromesso tecnico/economico.

Gli isolatori passanti a controllo di campo rappresentano la tecnologia vincente nelle applicazioni ad alta tensione. In figura 1.3, è raffigurata la configurazione base di quest'ultimo:



La caratteristica base di questo sistema consiste nell'uniformare la distribuzione di campo elettrico tra conduttore (normalmente in tensione) e la flangia (normalmente al potenziale di terra). L'obiettivo è quello di mantenere i valori di campo elettrico sotto certi limiti prestabiliti.

Si inseriscono delle armature concentriche nell'avvolgimento del condensatore in modo da dividere gradualmente la tensione. Lo sviluppo di questa tecnologia ha portato alla realizzazione di passanti fino a 1200kV.

Figura 1.3. Configurazione di un passante con controllo di campo

Si ha la possibilità di confrontare il passante con e senza controllo di campo attraverso un grafico che mostra l'andamento della tensione "E" in funzione alla distanza r (raggio) che indentifica la sezione del conduttore.

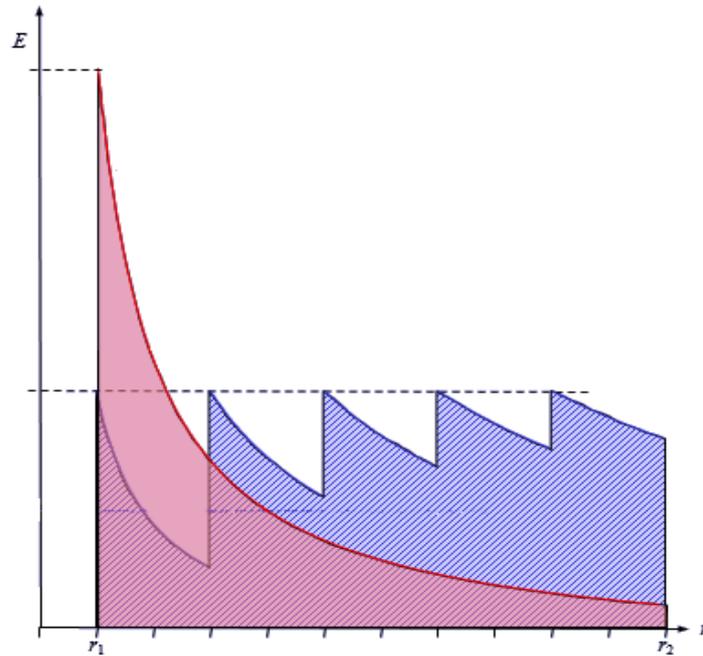
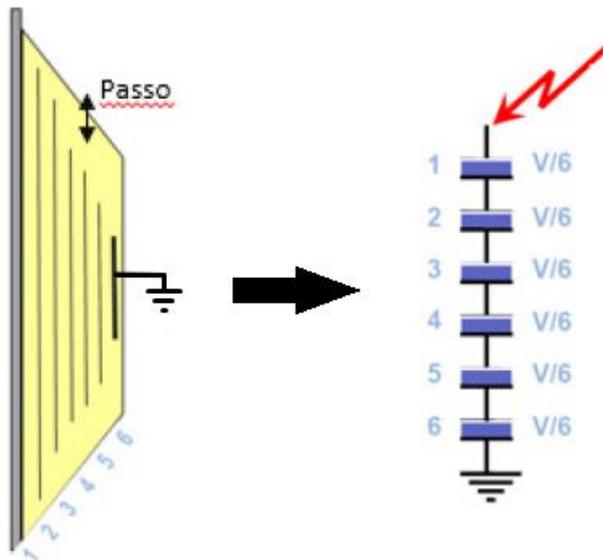


Figura 1.2. Andamento campo elettrico di un passante con (BLU) e senza controllo di campo (ROSSO).

Si evidenzia che per piccole sezioni la tecnologia vincente è quella a controllo di campo che garantisce il miglior compromesso in termini tecnici ed economici.

Di seguito in figura 1.5 è rappresentato lo schema semplificato del condensatore di un isolatore passante a controllo di campo;

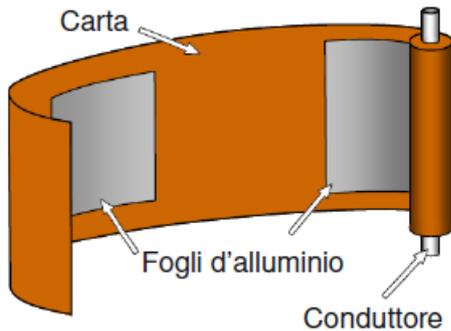


La schematizzazione avviene considerando il condensatore equivalente come somma di più condensatori in serie opportunamente costruiti.

Prende il nome di passo la distanza tra i bordi del passante e l'armatura. Un passo costante comporta un campo elettrico longitudinale costante.

Figura 1.5. Schema semplificato dei condensatori di un passante a controllo di campo.

La struttura del condensatore si ottiene avvolgendo una serie di strati concentrici dielettrico intorno al conduttore centrale, tali da ottenere gli stessi valori di capacità.



Con la configurazione concentrica si ottiene la stessa caduta di tensione per ogni condensatore.

Il campo elettrico risultante è longitudinalmente costante mentre variabile radialmente a causa della diversa distanza tra le varie armature.

Figura 1.3. Strati concentrici avvolti nel conduttore

Per dimensionare correttamente il condensatore è necessario rispettare i limiti fisici imposti dal dielettrico.

Le principali tipologie di isolamento caratterizzanti un passante sono:

- Carta impregnata in olio;
- Carta impregnata in resina;
- Fibra sintetica impregnata di resina;

La prima tipologia prende il nome di “Bushing OIP ( oil impregnated paper) e si caratterizzano per un isolamento interno composto da carta non trattata impregnata di olio isolante che avvolge tutto il condensatore, quest’ultimo è contenuto in un involucro isolante. Lo spazio interposto tra l’involucro e il condensatore è riempito con lo stesso olio utilizzato per la carta. Una delle pratiche per la determinazione dello stato di salute di questi passanti è l’analisi dei gas disciolti (DGA), la quale ha come scopo la misura e la valutazione degli elementi disciolti nel liquido. L’utilizzo di quest’isolamento permette di limitare le scariche parziali che si verificano all’interno del passante grazie alle proprietà dell’olio. Di contro, il rischio di infiammabilità è considerevolmente elevato.

I passanti che utilizzano carta impregnata in resina vengono denominati RIP dall’acronimo inglese “Resin Impregnated Paper”. L’isolamento interno è sempre costituito da un condensatore avvolto con carta ma l’impregnatura avviene in sottovuoto con resina epossidica che in una fase successiva si polimerizza. L’involucro e il condensatore sono separati sempre da un materiale ma in questo caso è schiuma poliuretana o gel. L’utilizzo di questa apparecchiatura consente di raggiungere valori di tensione elevati ma comunque inferiori rispetto a quelli ottenuti con i passanti OIP. Caratteristica vincente i passanti RIP sono: perdite di liquido pari a zero, basso livello di infiammabilità e ottima robustezza meccanica.

Infine, vi sono i passanti di tipo RIF/RIS dall'acronimo inglese: "Resin Impregnated Fiber/Syntetic" che utilizzano fibre sintetiche per avvolgere il condensatore; quest'ultime vengono impregnate con resina epossidica. Il condensatore è protetto da un involucro in silicone che viene direttamente stampato su di esso. L'utilizzo di questi passanti è limitato a livelli di tensione inferiori ai 235kV ma i vantaggi meccanici lo rendono estremamente competitivo nel suo campo di applicazione.

Di seguito, in figura 1.4, sono riportati alcuni dei passanti descritti precedentemente.

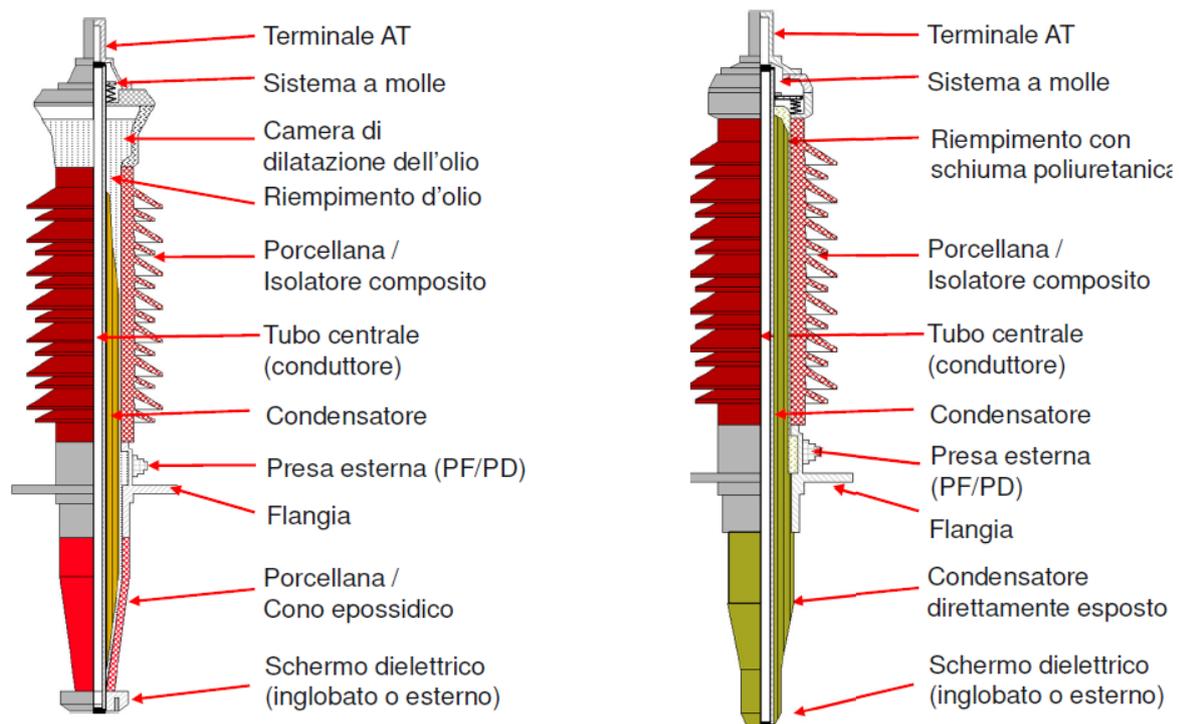


Figura 1.4. Passanti di tipo OIP (sinistra) e RIP(destra)

L'ultima tipologia di classificazione per i bushings si basa sulla tipologia di conduttore. Quest'ultimo si distingue in: treccia estraibile, perno estraibile e perno fisso.

Nel primo caso, dall'avvolgimento del trasformatore proviene la treccia in rame la quale viene saldata al capocorda e, successivamente, inserita nel canale centrale del passante fino a raggiungere la testa. Attraverso un sistema a bassa resistenza si collega il capocorda al terminale di alta tensione. Questo tipo di configurazione si adatta per portare correnti tra gli 800-1250 A e si caratterizza per una semplice installazione e un costo limitato.

Il conduttore a perno estraibile è costituito da un perno suddiviso in due parti (superiore e inferiore); la treccia proveniente dal trasformatore è saldata alla parte inferiore del perno. La

struttura in due parti è dovuta ad una semplicità costruttiva; in questo modo il costruttore del trasformatore può trasportare la macchina con il perno già saldato e collegarlo alla rete direttamente in loco. La connessione tra la parte superiore e inferiore avviene attraverso un serraggio, il perno superiore si collega ai terminali AT attraverso un sistema a bassa resistenza. Il vantaggio principale rispetto al conduttore a treccia è quello di poter raggiungere correnti dell'ordine dei 1250-1600 A mantenendo limitati i costi. Infine, il conduttore a perno fisso è costituito da un conduttore centrale non rimovibile che può essere un tondo o un tubo in rame o alluminio. Nella parte superiore il perno può uscire direttamente per formare il terminale AT oppure può essere collegato attraverso un sistema a bassa resistenza. Con questa tecnologia si raggiungono correnti molto elevate fino ai 6300 A ma il costo diventa significativo.

Di seguito sono rappresentate due delle tre configurazioni possibili dei conduttori:

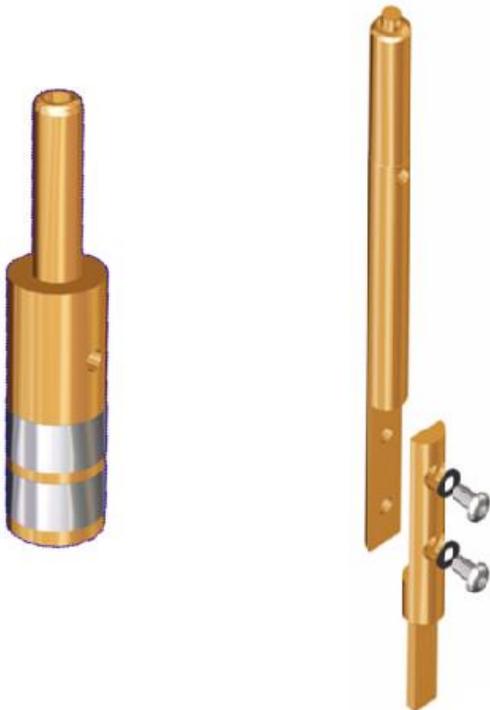


Figura 1.5. Struttura treccia estraibile (sinistra) e perno estraibile (destra).

Le varie tipologie di passanti alta tensione descritti precedentemente trovano varie applicazioni in relazione ai livelli di tensione del trasformatore:

- OIP per  $V_n \leq 1200\text{kV}$ ;
- RIP per  $V_n \leq 550\text{kV}$ ;
- RIS/RIF per  $V_n \leq 300\text{kV}$ .

Per applicazioni fino a 550kV si utilizzano isolatori Olio-SF<sub>6</sub> e Olio-Olio.

L'utilizzo dei passanti alta tensione non è rivolto solo al campo della corrente alternata ma si sta evolvendo anche in quello in corrente continua. Per queste particolari applicazioni si ha la necessità di utilizzare la tecnologia a isolamento solido. Di conseguenza il bushing deve necessariamente avere: condensatore di tipo RIP, isolatore composito e un riempimento solido del gap ( spazio interposto tra isolatore e condensatore). Il limite per i sistemi in DC è di 550kV. In casi particolari è possibile utilizzare una tecnologia ibrida; si utilizza un condensatore OIP nel lato olio del passante e il lato aria è con materiale composito e isolato tramite gas raggiungendo tensioni fino a 1100kV anche nel mondo della corrente continua.

### 1.3. Diagnostica di un passante alta tensione

Eseguire una diagnostica sistematica per i passanti ad alta tensione garantisce l'operatività e la salvaguardia del trasformatore. Nonostante sia molto costoso e complesso le grandi aziende produttrici di energia includono nella loro politica dei sistemi di monitoraggio per l'analisi della degradazione di un passante. Tra le diagnostiche predittive maggiormente applicate vi sono: la termografia e i test elettrici; quest'ultimi includono le misure di capacità, perdite nel dielettrico,  $\tan(\delta)$  e scariche parziali (SP). Nonostante la difficoltà pratica un'altra tipologia di analisi è quella dell'olio. Questa risulta essere uno degli strumenti più efficienti e affidabili per la rilevazione dell'invecchiamento e il degrado in un passante. Le azioni predittive elencate precedentemente sono fondamentali per determinare le corrette azioni di manutenzione che devono essere eseguite.

Come descritto nel capitolo 1.2 la tecnologia dei passanti alta tensione si è evoluta col tempo portando a diverse classificazioni: RBP, OIP, RIP.

Ai giorni d'oggi i passanti OIP sono quelli dominanti nel mercato. In questi passanti il nucleo del condensatore è impregnato con olio minerale del trasformatore ed è collocato all'interno di un involucro in porcellana o di un materiale composito per evitare l'ingresso di umidità. Si identificano inoltre due sottocategorie riguardanti i passanti OIP:

- Passanti olio-aria dove il capacitore è impregnato con olio minerale ed è in contatto con aria secca. Inoltre, i terminali ad alta tensione si trovano in aria;
- Passanti olio-Sf<sub>6</sub> dove il capacitore è sigillato ed è completamente immerso nell'olio isolante. I terminali ad alta tensione si trovano circondati da gas Sf<sub>6</sub>;

In entrambi i casi il condensatore rimane in un ambiente liquido e pertanto possono verificarsi problemi di perdita intorno alle guarnizioni. Per i passanti olio-Sf<sub>6</sub> si aggiunge la problematica delle perdite di gas ad alta pressione. Nel caso in cui si verifichi un'espansione dell'olio, che superi i limiti preimpostati, a causa di un incremento di temperature si ha l'intervento di un allarme e di una serie di dispositivi di protezione che disalimenteranno la macchina.

Il primo metodo per trarre informazioni sullo stato di salute di un passante è l'ispezione visiva. La presenza di elementi come ruggine, perdite di olio, crepature o tracce di scariche sulla superficie di porcellana sono prove evidenti sull'invecchiamento del passante e sono condizioni sufficienti per avviare le manovre di manutenzione. Per i passanti olio-aria il campionamento dell'olio non è particolarmente difficile, potrebbe essere eseguito dalla parte superiore della boccia usando un tubo di collegamento o una siringa. Per una corretta misurazione è necessaria

la misura della temperatura dell'olio e la quota di espansione del soffiato prima e dopo il campionamento. Inoltre, è opportuno riabboccare con olio minerale la quantità di olio tolta nella fase iniziale.

I monitoraggi basati sull'analisi dell'olio includono, generalmente, dei test base che richiedono un minimo volume di olio, I principali test raccomandati dalla norma sono:

- Dissolved Gas Analysis (DGA) con riferimento alla norma IEC 60567;
- Water content con riferimento alla norma IEC 60814;
- Dielectric dissipation factor (DDF) con riferimento alla norma IEC 60247;

La tecnica DGA include anche l'analisi del gas SF<sub>6</sub> disciolto nell'olio nel caso in cui il passante sia Olio-Gas. L'analisi dei gas disciolti, nelle applicazioni ad alta potenza, rappresenta il miglior strumento per acquisire informazioni sulla degradazione dell'olio e della carta. Inoltre, fornisce dati sulle scariche parziali ed altri problemi di natura elettrica. La misurazione della concentrazione del gas SF<sub>6</sub> nel liquido isolante permette di tener sotto controllo la tenuta delle guarnizioni. In ogni caso, l'utilizzo della DGA per il rilevamento dell'esafluoruro di zolfo comporta una serie di problemi: innanzitutto questo metodo necessita di un metanizzatore formando solfuro di nichel, il quale rimarrebbe intrappolato. Questo causa una perdita progressiva del gas diminuendo l'efficienza del metanizzatore. Un altro problema è la difficoltà di separare l'SF<sub>6</sub> da altri gas come l'etilene o l'acetilene utilizzando il cromatografo classico. È possibile utilizzare un approccio differente per rilevare il gas attraverso la DGA; utilizzando colonne gascromatografiche che consentono di migliorare la separazione del composto.

Come descritto precedentemente i valori tipici della DGA per i passanti sono raccolti in due documenti: "IEC 60599 e IEC TR61464". Le tabelle riportate nelle due norme convergono agli stessi valori di riferimento.

Gas Description		Key Gas Concentration (in ppm)		
		Normal Limits* (<)	Action Limits** (>)	Potential Fault Type
Hydrogen	H <sub>2</sub>	150	1,000	Corona, Arcing
Methane	CH <sub>4</sub>	25	80	Sparking
Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	15	70	Arcing
Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	20	150	Severe overheating
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	10	35	Local Overheating
Carbon monoxide	CO	500	1,000	Severe overheating
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	10,000	15,000	Severe overheating
Total Combustibles	TDCG	720	4,630	
* As the value exceeds this limit, sample frequency should be increased with consideration given to planned outage in near term for further evaluation.				
** As value exceeds this limit, removal of transformer from service should be considered.				
This table is derived from information provided within ANSI/IEEE C57.104				

Figura 1.6. Tabella riferimento gas disciolti

La struttura di un passante alta tensione è sigillata e pertanto, i gas non hanno modo di fuggire dall'olio. Durante la vita di un passante il rapporto CO/CO<sub>2</sub> è maggiore rispetto all'accumulo che si ha nei trasformatori di potenza. Spesso il monossido di carbonio è presente alla stessa concentrazione del biossido, mentre nei trasformatori questo rapporto sarebbe impossibile. La differenza sta proprio nel fatto che il trasformatore è un sistema aperto e quindi il carbonio, essendo un gas volatile, si dissocia facilmente dall'olio.

I passanti identificano una parte critica dei trasformatori e i loro guasti comportano eventi distruttivi con un elevato rischio di incendio. Le loro ispezioni, attraverso DGA, test elettrici e meccanici garantiscono il corretto funzionamento della macchina.

Questi valori sono normalmente usati come riferimento per la diagnostica di un passante ma, l'esperienza dimostra che alcuni valori possono non essere realistici. Dalle esperienze pratiche si ottengono dei valori elevati di gas disciolti anche in assenza di difetti di costruzione.

#### **1.4. Montaggio di un isolatore passante.**

Il corretto montaggio di un isolatore passante alta tensione di un trasformatore è garanzia per il normale funzionamento della macchina. È necessario soddisfare scrupolosamente le prescrizioni fornite dalle normative di riferimento; con particolare riguardo ai capitoli riguardanti le condizioni atmosferiche e la prolungata esposizione all'aria. La circolazione d'aria che avviene all'interno della cassa di un passante, in seguito alla rimozione della flangia, può comportare problemi non indifferenti alla struttura.

La fase precedente al montaggio consiste nell'accettarsi di riempire con olio il trasformatore sino a ricoprire gli avvolgimenti ed i principali componenti degli isolatori. È necessario verificare la presenza dei seguenti componenti:

- Schermo elettrico lato olio, se previsto, e i relativi pezzi per il collegamento;
- Adattatori e relativi trasformatori di corrente;

Bisogna fare attenzione che durante la fase di montaggio nessuna zona sia danneggiata in conseguenza di urti o rotazioni anomale su vari supporti e rimuovere qualsiasi oggetto estraneo, quali: polvere e sporcizia dall'estremo lato olio del passante.

Il primo elemento da installare è la parte costituente il contatto del lato olio e il relativo tirante in pressione.

Per estrarre l'isolatore passante AT dall'imbballaggio si utilizzano degli appositi occhielli di sollevamento predisposti sulla flangia ad un legaccio di sicurezza situato verso la parte superiore dell'involucro. Prima del montaggio definitivo si dispone l'isolatore in verticale mediante un apposito cavalletto. Nel caso in cui venga richiesto un montaggio inclinato allora si regolerà la lunghezza del legaccio in modo tale da far assumere all'isolatore l'inclinazione voluta manovrando opportunamente il gancio della gru.

Durante la fase di montaggio dei passanti, il trasformatore non deve rimanere aperto a lungo; per evitare la circolazione di aria all'interno si rimuove una flangia per volta.

I sistemi di montaggio variano in relazione alla tipologia dell'isolatore passante; di seguito verranno indicate le principali differenze tra isolatori con caratteristiche nominali diverse:

- Isolatori passanti aventi  $V_n < 36\text{kV}$ ;  
Normalmente di tipo ceramico a riempimento di olio o a condensatore, in carta-olio o carta-resina; la corrente nominale che li caratterizza è compresa tra:  $400\text{A} < I_n < 20\text{kA}$ .

Il loro montaggio è meno problematico rispetto a quelli AT poiché si ha l'assenza di campi elettrici elevati. È fondamentale non generare tensioni alla base dell'isolatore quando si effettua la connessione attraverso il terminale dell'avvolgimento.

- Isolatori passanti aventi  $V_n > 36\text{kV}$  con treccia passante;

Normalmente del tipo a condensatore in carta-olio o in carta-resina con il lato olio rientrante. In questi isolatori è realizzata una distribuzione capacitiva della tensione, aggiungendo strati di conduttore nel materiale isolante. In questo modo si ottiene una tensione verso massa dell'estremità inferiore del passante di soli  $2/3$  della tensione nominale e, di conseguenza non sono necessari schermi elettrici. In questa tecnologia la corrente fluisce attraverso una cava flessibile situata all'interno di un tubo metallico. È strettamente necessario che la parte conica delle connessioni proveniente dall'avvolgimento si adatti perfettamente al profilo della parte rientrante dell'isolatore.

- Isolatori passanti aventi  $V_n > 132\text{kV}$ ;

Normalmente sono passanti a condensatore con una corrente nominale di circa  $1600\text{A}$ . Nel caso di treccia passante, il terminale estremo consiste di due parti avvitate tra loro di cui una forata in modo tale da poter saldare la treccia che porta la corrente. Sono presenti più fori per compensare le tolleranze sulla lunghezza del cavo. Normalmente questi isolatori sono dotati di uno schermo sul lato olio in modo da ridurre le sollecitazioni dielettriche nell'area circostante l'estremità inferiore del passante.

Nel caso di isolatori aventi perno rigido il collegamento attraverso l'avvolgimento si realizza mediante capicorda imbullonati alla piastra di contatto dell'isolatore, successivamente la piastra viene pressata contro l'estremità inferiore del tubo centrale dell'isolatore.

Terminato il montaggio degli isolatori occorre verificare che:

- Le guarnizioni della flangia siano montate correttamente e in buone condizioni;
- Tutte le parti che portano corrente devono essere pulite e serrate in modo adeguato;
- Tutti gli isolatori devono essere sfiatati attraverso gli appositi tappi dopo la fase di riempimento con l'olio;

Parte conclusiva del montaggio è la verifica della corretta messa a terra degli isolatori, nel caso di passanti dotati di presa per la misura del  $\tan(\delta)$  è obbligatorio non metterli in tensione prima di aver montato il test tap.

## 2. Analisi tecnica

### 2.1. Parametri fisici caratterizzanti

I parametri principali che permettono una caratterizzazione dello stato di un passante sono: capacità equivalente e il fattore  $\tan(\delta)$ . Inoltre, particolare rilevanza lo rivestono i fenomeni di scarica parziali che si verificano all'interno del passante.

Per definire un opportuno schema elettrico equivalente di un passante è necessario fare riferimento alla sua configurazione strutturale mostrata in figura 2.1

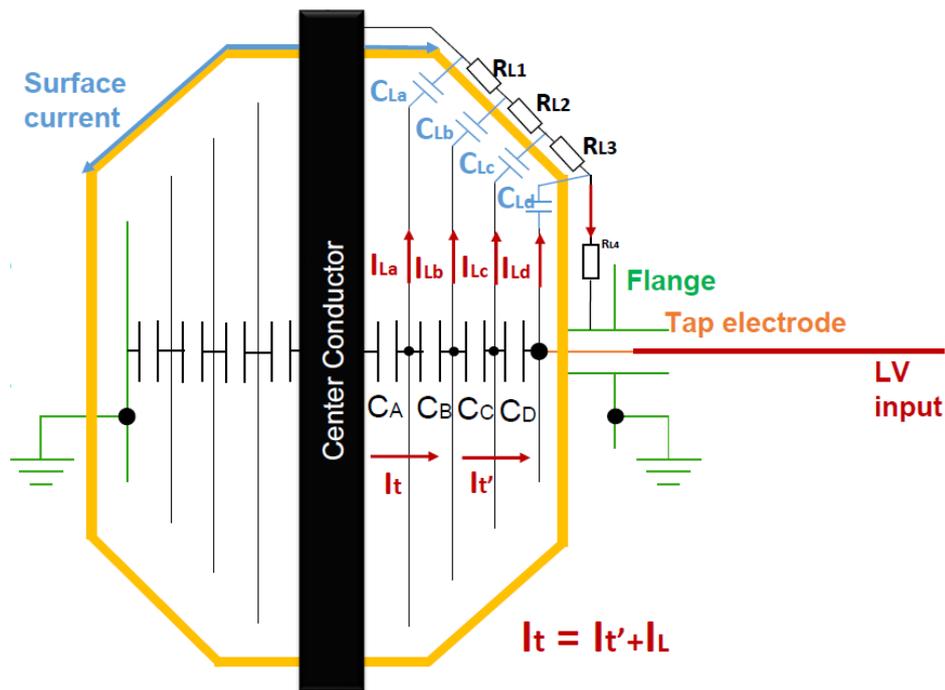


Figura 2.1. Struttura di un passante

La quale si schematizza semplicemente come:

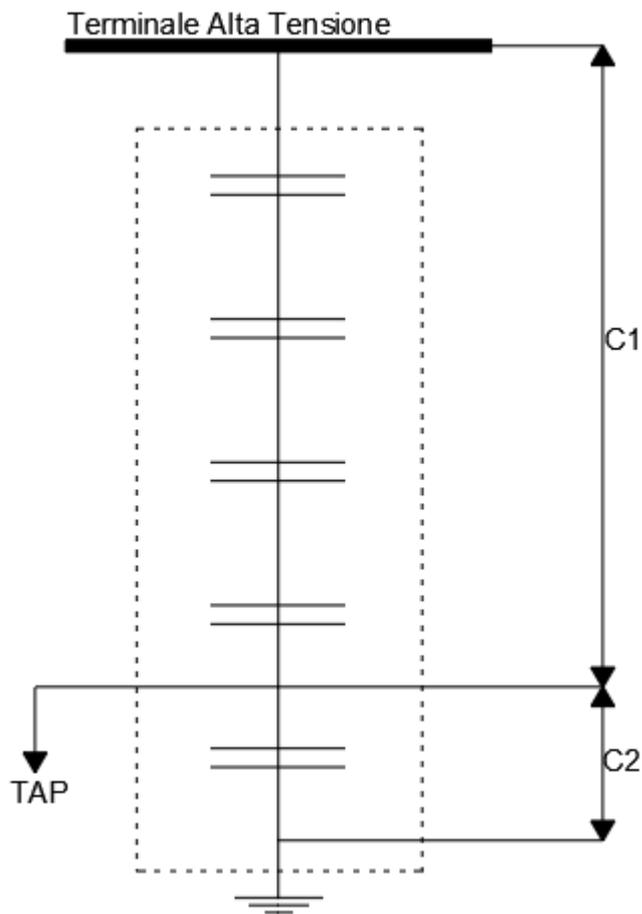


Figura 2.2. Schema elettrico capacitivo equivalente

Le capacità  $C_1$  e  $C_2$  illustrate nella figura precedente sono caratterizzanti per il corretto funzionamento dei passanti. Il parametro  $C_1$  rappresenta la capacità totale formata dalla serie delle capacità che si presentano tra il conduttore e il test tap. Mentre  $C_2$  identifica la capacità formata tra il test tap e la flangia del passante.

Il  $\tan(\delta)$  prende il nome di fattore di dissipazione ed è definito come la misura dal conduttore centrale del condensatore passante al test tap. Le misure di capacità e  $\tan(\delta)$  permettono di verificare la qualità dell'isolamento di un passante garantendone il corretto funzionamento durante tutto il periodo della sua vita utile. Nel caso in cui il test tap sia chiuso allora la capacità  $C_2$  risulterà essere in serie con la  $C_1$  ottenendo la capacità totale del bushing. Quest'ultima identifica la capacità equivalente tra il conduttore centrale e la flangia. Inoltre, attraverso la copertura del trasformatore si collega la flangia a terra.

Considerando lo schema equivalente si evidenzia, facilmente, che la capacità totale sarà la più piccola della più piccola. Nel caso in cui si verifichi una situazione di corto circuito per la quale

uno dei condensatori in serie venga escluso allora la capacità equivalente incrementa. La misura del fattore di dissipazione garantisce una buona informazione sulla qualità dell'isolamento del passante. Il  $\tan(\delta)$  definito come il rapporto tra la corrente che circola attraverso le impurità, associate alle resistenze, e la corrente che circola attraverso le capacità pure del passante. Pertanto, un incremento di questo parametro rappresenta il deterioramento dell'isolamento rispetto al suo stato iniziale. L'angolo  $\delta$  prende banalmente il nome di angolo di perdita.

Si trascurano le impurità e si considera un sistema AC nel quale la capacità ideale è alimentata da una forma d'onda sinusoidale della tensione si ottiene un angolo di sfasamento tra la tensione e la corrente pari a  $90^\circ$  dove la corrente sarà esprimibile attraverso la relazione:

$$|I_c| = |\omega \cdot C \cdot V|;$$

Le impurità sono rappresentate da dei resistori in parallelo alle capacità. La corrente  $I$ , nella realtà fisica dei fenomeni, non è puramente capacitiva ma, circolando attraverso una capacità e una resistenza si caratterizza per una componente reale e immaginaria.

In figura 2.3 è rappresentato lo schema elettrico semplificato di un passante:

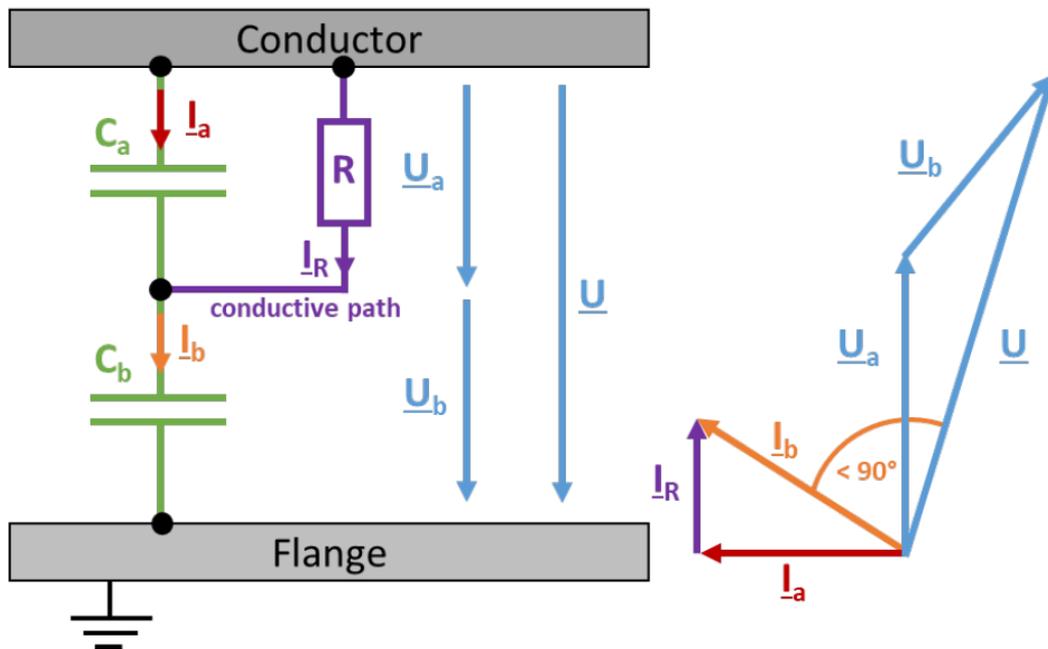


Figura 2.3. Schema elettrico semplificato

Dove:

$$\bar{U} = \bar{U}_a + \bar{U}_b \dots \dots \dots \text{eq2.1}$$

$$\tan(\delta) = \frac{I_r}{I_a}; \dots\dots\dots \text{eq2.2}$$

$$\bar{I}_b = \bar{I}_a + \bar{I}_r; \dots\dots\dots \text{eq2.3}$$

$$I_b = \frac{\omega \cdot c \cdot V}{\cos(\delta)}; \dots\dots\dots \text{eq2.4}$$

Determinando le perdite nel dielettrico si ottiene:

$$P_d = V \cdot I_b \cdot \cos \varphi = V \cdot I_b \cdot \sin \delta = V \cdot \frac{\omega \cdot c \cdot V}{\cos \delta} \cdot \sin \delta = \omega \cdot c \cdot V^2 \cdot \tan \delta; \dots \text{eq2.5}$$

Si evidenzia come le perdite nel dielettrico sono direttamente proporzionali ai fattori di dissipazione  $\tan(\delta)$  e alla capacità  $c$ . Dipendono, inoltre, dalla pulsazione  $\omega$  e quindi dalla frequenza. Il fattore di dissipazione viene utilizzato principalmente dai paesi Europei mentre in altri si predilige utilizzare il fattore di potenza. Si usa il cosiddetto “Power factor” esprimibile dalla seguente relazione:

$$PF = \frac{\tan \delta}{\sqrt{1+\tan \delta}}; \dots\dots\dots \text{eq2.6}$$

Vediamo cosa comporta l’incremento delle capacità a causa di un corto circuito di uno dei condensatori disposti in serie; I passanti sono costruiti per sistemi ad alti livelli di tensione e, pertanto quando si dimensiona un isolatore passante è fondamentale che abbia un elevato livello di isolamento. Quest’ultimo deve essere maggiore rispetto al valore associato agli avvolgimenti del trasformatore. La normativa impone che il valore in kVp del livello di isolamento del passante deve essere tale da non procurare alcun danno alla macchina stessa.

È necessaria una coordinazione tra l’isolamento degli avvolgimenti e quello riferito al passante rispetto agli effetti di picco di impulsi.

Per l’analisi di un passante alta tensione bisogna tener conto della distanza d’arco. Quest’ultima identifica la minor distanza in aria dell’isolatore tra le parti metalliche con tensione normale di lavoro. Una delle caratteristiche che influenza la distanza d’arco è l’altitudine; nel caso in cui il trasformatore venga installato in luoghi con altitudine superiore ai 1000m allora la distanza d’arco deve essere aumentata. Poiché la densità dell’aria alle alte altitudini è minore rispetto a quella al livello del mare comporta la diminuzione della forza associata al dielettrico. È

statisticamente dimostrato che la distanza d'arco deve essere incrementata dell'1% ogni 100m rispetto al livello del mare.

## **2.2. Scariche parziali nei passanti**

Il fenomeno delle scariche parziali si verifica con la presenza di scariche elettriche nell'isolatore. Quest'ultime avvengono all'interno di vacuoli o cavità in dielettrici liquidi o solidi. Principalmente si suddividono in due categorie:

- Scariche parziali esterne;
- Scariche parziali interne;

Le scariche parziali esterne si manifestano sulla superficie di un materiale isolante solido e nei gas attorno agli elettrodi. L'effetto corona è l'esempio generico di scarica parziale esterna. Questo tipo di fenomeno si verifica spesso dove vi è la presenza di bordi o bordi taglienti. Viceversa, le scariche parziali interne si verificano in presenza di vuoti o cavità riempite di gas all'interno di un isolante solido o liquido. Questi vuoti sono generalmente creati da un distacco parziale del materiale isolante e si verificano nei bordi di una superficie metallica.

Se un elettrodo è collocato all'interno di un materiale isolante per migliorare il campo elettrico e si verificano fenomeni di scarica parziale allora quest'ultimi possono causare elementi distruttivi per l'intero sistema. Causa principale di questi fenomeni è l'accelerazione del processo d'invecchiamento del materiale aumentando la possibilità che si verifica un guasto nel passante compromettendo l'intera macchina.

Oltre alle macrocategorie elencate precedentemente le scariche parziali si suddividono in:

- Scariche elettriche: movimento della carica elettrica attraverso il mezzo isolante;
- Scarica parziale: tipo di scarica elettrica che collega parzialmente il mezzo isolante tra due conduttori;
- Scarica superficiale: tipo di scarica parziale che si verifica sulla superficie di materiali solidi o liquidi;
- Scarica a corona: è una scarica parziale esterna che si verifica nell'isolamento dei conduttori (liquidi o gassosi). Di conseguenza non si manifesta all'interno degli isolanti;

Nel caso di campi elettrici uniformi la ionizzazione porta a una distribuzione uniforme delle scariche mentre nel caso di campi disomogenei si riscontrano oltre alle scariche elettriche anche scariche acustiche e luminose.

Ai giorni d'oggi lo studio delle scariche parziali riveste un ruolo fondamentale; col passare degli anni l'aumento delle apparecchiature elettriche ha comportato un incremento della densità di potenza con annesso aumento degli stress elettrici sui materiali isolanti. Nonostante lo sviluppo tecnologico abbia migliorato la qualità delle apparecchiature il processo di industrializzazione comporterà sempre delle irregolarità sulle superfici dei materiali prodotti. I vuoti presenti nei materiali isolanti solidi provocano un disturbo del campo locale, il quale rappresenta il punto d'inizio per il danneggiamento tramite scariche parziali.

Il contenuto energetico di una scarica parziale è relativamente basso, ma essendo un fenomeno ripetitivo nel tempo il materiale è sottoposto ad uno stress significativo. A causa della concentrazione locale la durata di vita del materiale diminuisce in maniera esponenziale.

Per la corretta analisi di un passante alta tensione occorre non solo verificarlo meccanicamente, termicamente ed elettricamente ma è necessario effettuare i test sulle scariche parziali, le quali hanno un effetto esclusivamente negativo sul materiale isolante.

Lo studio di questi fenomeni nei liquidi isolanti è significativo; questi fluidi sono utilizzati all'interno di involucri chiusi equipaggiati per l'alta tensione. Il liquido isolante maggiormente utilizzato è l'olio minerale; le proprietà isolanti del fluido non dipendono dal materiale stesso ma è funzione dei materiali esterni che si trovano all'interno. Le fibre cellulose, i gas disciolti, contenuto d'acqua e particelle meccaniche sono determinanti per le proprietà isolanti del fluido.

La disomogeneità è già presente per sua natura nel materiale isolante ma la presenza di altri elementi favoriscono l'inizializzazione del fenomeno delle scariche parziali. Quest'ultime hanno come risultato la carbonizzazione dell'olio e la formazione di acidi nello stesso comportando un incremento del fattore di perdita dell'intero sistema. La forza dell'isolante è inversamente proporzionale ai gas disciolti o alle bolle interne. Gli isolanti liquidi contengono vacuoli, i quali causano una diminuzione della costante dielettrica caratteristica. Poiché l'intensità del campo elettrico nel vuoto è maggiore rispetto all'isolamento del liquido nasce la possibilità che si verifichi la rottura del campo associato ai vacuoli in condizioni di normale funzionamento.

Il fenomeno dell'assorbimento o della generazione di gas prende il nome di "gassing". Durante la fase di assorbimento del gas le scariche parziali tendono a diminuire viceversa, durante la fase di generazione si produrranno più scariche fino alla completa rottura del materiale isolante. La "gassificazione" di un liquido non dipende esclusivamente dalla natura del fluido ma da

parametri sperimentali come: tensione applicata, durata della tensione e la geometria della configurazione di prova (geometry of test set-up). Al primo evento di scarica parziale corrisponde la generazione di una bolla di gas, la quale genererà una reazione a catena.

L'analisi delle scariche parziali che si verificano nei materiali isolanti solidi è di particolare importanza. Quest'ultimi svolgono la funzione di supporto meccanico e limitano il potenziale elettrico agli elettrodi. Questa tipologia di isolanti è ampiamente utilizzata negli apparecchi elettrici; rispetto gli isolanti a fluido si caratterizzano per valori di rottura del campo elettrico molto più elevati.

Materiali inorganici quali porcellana e vetro rappresentano una delle due grandi categorie riguardanti gli isolanti solidi; le loro proprietà non variano anche se sono sottoposti a fenomeni di scarica parziali a lungo termine inoltre, hanno eccellenti proprietà termiche. La seconda categoria è costituita da materiali organici polimerici e resina; le loro proprietà sono sensibili al fenomeno delle scariche parziali a lungo termine, le quali comportano la rottura completa di questi materiali. Attualmente non è ancora stata compresa la relazione fisica che vi è tra le SP e i materiali polimerici.

### **2.2.1. Pattern delle scariche parziali**

Come descritto precedentemente, le scariche parziali in un isolante solido o liquido sono considerate pericolose e il livello di pericolosità dipende dal tipo di materiale adoperato per l'isolamento. L'individuazione del punto dell'area dove si verifica la scarica è molto complicata. Attraverso l'uso del "PD Pattern" è possibile determinare il tipo di scarica parziale e dove essa si verifica. Il tipo di pattern dipende dalla posizione di possibili difetti di fabbricazione, una corretta analisi garantisce il miglioramento di quest'ultimi.

Lo strumento che permette la visualizzazione dei pattern è l'oscilloscopio, la tensione alternata nei pattern è sovrapposta con gli impulsi delle scariche. In relazione al tipo di SP si identificano pattern differenti, di seguito ne sono rappresentati alcuni:

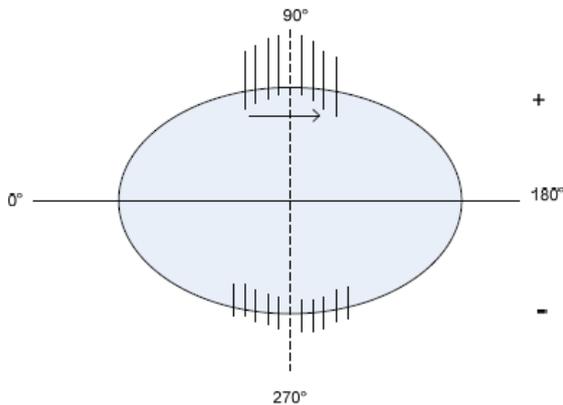


Figura 2.4. Pattern di scariche corona.

### Modello PD di scariche corona nei materiali isolanti liquidi.

+ Si verifica quando un elemento di piccole dimensioni viene immerso nell'isolamento del liquido. Queste scariche si verificano in entrambi i semi cicli. In questo caso, si verificano grandi impulsi nel ciclo positivo e piccoli nel ciclo negativo. Gli impulsi aumentano con l'aumentare della tensione ma l'ampiezza rimane la stessa.

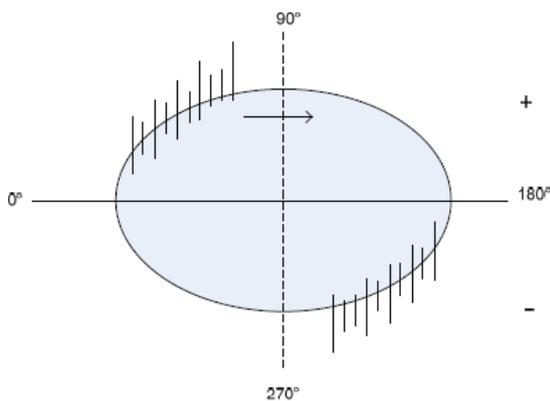


Figura 2.5. Pattern di scariche parziali nei solidi

### Modello PD di vacuoli presenti nei materiali solidi.

+ Nel caso in cui nel materiale solido isolante sia presente un vacuolo pieno di gas, si verificano degli impulsi tra lo zero e il picco per entrambi i semi cicli. Statisticamente l'ampiezza degli impulsi è la stessa per entrambi i semi cicli. Si estinguono al raggiungimento del picco di polarità. Le scariche parziali di questa tipologia sono particolarmente pericolose per l'isolamento.

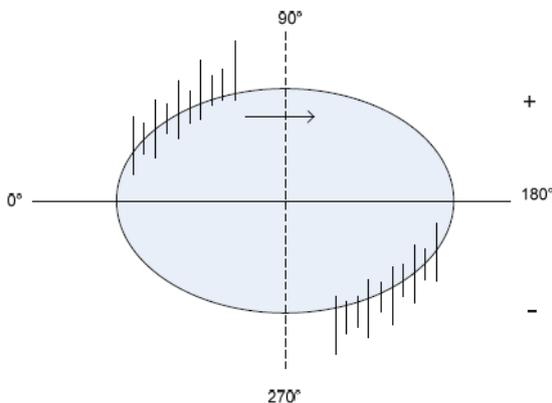


Figura 2.6. Pattern di scariche parziali tra piastre metalliche

### Modello Pd di scariche parziale che si verifica tra due piastre metalliche in un passante capacitivo.

+ Le scariche di questa tipologia hanno lo stesso modello di quello dei vacuoli contenenti gas. Analogamente, queste scariche sono particolarmente dannoso per i passanti capacitivi.

## 2.2.2. Circuito equivalente delle scariche parziali all'interno di una cavità.

La scarica parziale che si verifica all'interno di una cavità può essere rappresentata attraverso un circuito elettrico equivalente. La PD (partial discharge) che si verifica all'interno della cavità risulta essere in parallelo con l'arco stesso. Nel caso in cui è applicata una tensione alternata, la differenza di potenziale attraverso la cavità non diminuisce ma si incrementa, la sovrapposizione del campo elettrico prodotto dal trasferimento di carica nella cavità e quello principale è causa dell'incremento della tensione nella cavità stessa. Quando questa tensione raggiunge il valore di rottura della cavità riempita di gas, si verifica nuovamente una scarica. Terminato il fenomeno rimane una tensione residua attraverso la cavità che favorisce la nascita di nuove scariche. Quando la tensione della scarica parziale nella cavità diventa zero ma continua a ripetersi periodicamente durante un ciclo di tensione allora vuol dire che la tensione applicata è maggiore rispetto alla iniziale in polarità positiva o negativa. In questo caso il modello PD non è regolare a causa della carica lasciata sulla cavità.

Di seguito è rappresentato lo schema elettrico semplificato associato al fenomeno descritto precedentemente:

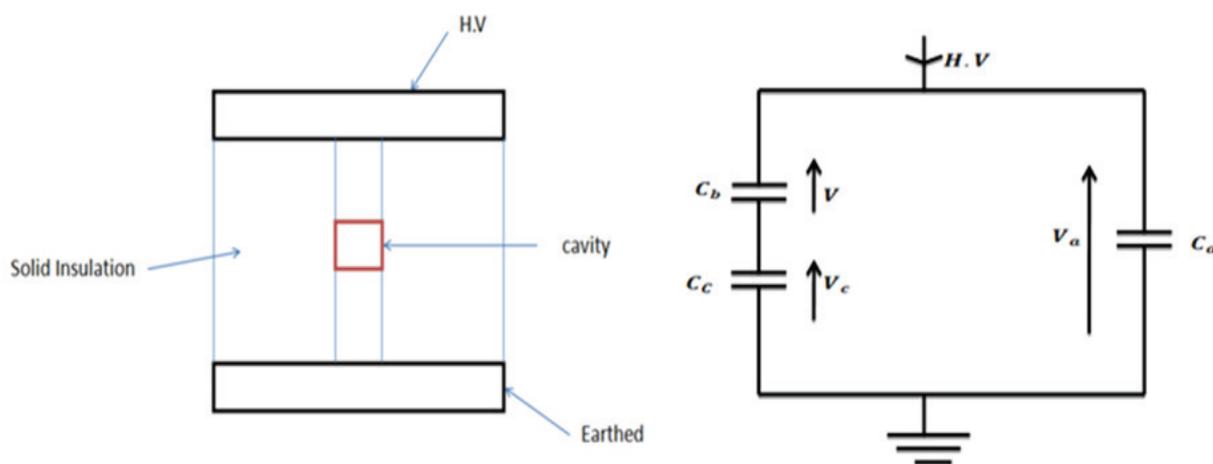


Figura 2.7. Schema semplificato di una PD.

Dove:

$C_c$ : rappresenta la capacità della cavità;

$C_b$ : rappresenta la capacità del materiale isolante solido, in serie con la cavità;

$C_a$ : rappresenta la capacità del materiale isolante solido residuo;

Si determina l'energia associata ad una scarica parziale come segue:

$$C = C_a + \frac{C_b \cdot C_c}{C_b + C_c}; \dots \text{eq.2.1}$$

$$\Delta V_a = \Delta V_c \cdot \frac{C_b}{C_a + C_b}; \dots \text{eq.2.2}$$

$$q_a = \Delta V_c \cdot \frac{C_b \cdot C_a}{C_b + C_a}; \dots \text{eq.2.3}$$

Essendo la capacità  $C_b$  molto più piccola rispetto le altre due si ottiene:

$$q_a = \Delta V_c \cdot C_b; \dots \text{eq.2.4}$$

L'energia associata ad una scarica si determina dalla differenza tra l'energia prima e dopo l'evento di scarica parziale nella cavità;

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_c \cdot (u^2 - v^2); \dots \text{eq.2.5}$$

Se è presenta della tensione residua nella cavità la tensione attraverso la cavità è data dalla relazione:

$$\Delta V_c = u - v; \dots \text{eq.2.6}$$

Tramite semplici passaggi matematici si ottiene la seguente relazione:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_c \cdot \Delta V_c \cdot u; \dots \text{eq.2.7}$$

Quando la scarica avviene alla tensione di picco, la tensione di breakdown è data da:

$$u = \frac{C_b}{C_b + C_c} \cdot V_{pk}; \dots \text{eq.2.8}$$

Si ottiene pertanto:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_c \cdot \Delta V_c \cdot \frac{C_b}{C_b + C_c} \cdot V_{pk}; \dots \text{eq.2.9}$$

Essendo  $C_b \ll C_c$  ne consegue:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_b \cdot \Delta V_c \cdot V_{pk}; \dots \text{eq.2.1.1}$$

### 2.3. Limiti di temperatura di un passante AT.

Il corretto funzionamento di un passante alta tensione per i trasformatori non dipende esclusivamente dai suoi parametri elettrici ma, è notevolmente influenzato dalle sue caratteristiche termiche. In relazione alla tipologia del passante varia la temperatura limite associata alle parti metalliche poste a contatto con il materiale isolante.

La normativa IEC 60137 fornisce le indicazioni cardine per l'analisi termica di un passante indicando le principali temperature di riferimento e l'innalzamento massimo della temperatura rispetto la temperatura media giornaliera.

Nelle condizioni standard fornite dalla norma, le temperature limite sono:

- 105°C per i passanti OIP: Classe A;
- 120°C per i passanti con carta impregnata in resina: Classe B;
- 130°C per i passanti isolati tramite gas: Classe C;

Nel caso in cui vengano utilizzati materiali isolanti differenti i valori di temperatura sono indicati dalle norme IEC 60216-2 e IEC 60505. Le temperature relative, fornite della norma ai terminali e alle connessioni del passante sono riportate nella tabella in Figura14 mentre le temperature di esercizio del passante, secondo la norma IEC 60137, sono riportate nella tabella in figura 2.8.

Subject	Temperature [°C]
<b>Ambient air:</b>	
- Maximum	40
- Maximum daily mean(open air)	30
- Maximum daily mean (air-insulated ducting)	70
- Maximum annual mean	20
- Minimum	-
• Indoors	
Class 1	-5]
Class 2	-15
Class 3	-25
• Outdoors	
Class 1	-10
Class 2	-25
Class 3	-40
<b>Oil in transformers:</b>	
- Maximum	
• For normal load	100
• for emergency duty	115
- Maximum daily mean	90
<b>Other media:</b>	
<b>gaseous and non gaseous:</b>	-
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. The normal minimum ambient air temperature is Class 1</li> <li>2. The values for oil in transformers are in accordance with IEC 60076-1 and IEC 60076-2. The value for emergency duty is in accordance with IEC 60076-7</li> <li>3. In the absence of other information, reference should be made in principle to the corresponding IEC apparatus standard for which the bushing is intended. Whereby particular attention should be paid to bushings one end of which is to be immersed in gas.</li> </ol>	
NOTE 1: The daily mean temperature of the immersion medium should be calculated by averaging 24 consecutive hourly readings	
NOTE 2: By agreement between purchaser and supplier, other temperature ranges may be adopted	

Figura2.8. Condizioni operative

Description of component		Maximum Temperature rise [°K]	Maximum Temperature [°K]	Comments
<b>Spring contacts</b>	Copper and copper alloys, uncoated:			D
	- In air	45	75	
	- In SF6	60	90	
	- In oil	50	80	B
	Tinned in air, SF6 or oil	60	90	
	Silver/nickel-plated:			
- In air or SF6	75	105		
- In oil	60	90	B	
<b>Screwed contacts</b>	Copper, aluminium and their alloys, uncoated:			
	- In air	60	90	
	- In SF6	75	105	
	- In oil	70	100	B
	Tinned:			
	- In air or SF6	75	105	
	- In oil	70	100	B
	Silver/nickel-plated			
	- In air or SF6	85	115	
	- In oil	70	100	B
<b>Terminals to be connected to exterior conductors by screws or bolts</b>	Copper, aluminium and their alloys:			
	- Uncoated	60	90	
	- Tinned	75	105	
	- Silver or nickel-plated	75	105	C
<b>Metallic parts in contact with</b>	Insulation class:			
	- A (OIP)	75	105	
	- E (RBP and RIP)	90	120	
	- (GIF)	E	E	
	- SF6	100	130	
	- Oil		E	
A- The temperature rise values are based on IEC 60943 with a maximum daily mean temperature of 30°C. For further information reference should be made to IEC 60943 B- For synthetic insulating liquids (silicone, esters), higher values may be agreed between purchaser and supplier. C- If heavy oxidation is to be expected, the temperature rise shall be limited to 50 K D- A spring contact is a connection maintained by spring pressure for example a plug-in connection. E- The temperature limit shall be stated by the supplier.				

Figura 2.9. Tabella di riferimento fornita dalla norma IEC.

La corretta analisi termica di un passante garantisce l'efficienza e l'affidabilità degli stessi. La normativa IEC 60137-8.7 indicano i principali test di temperatura che devono essere eseguiti. La norma indica il campo di applicabilità dei test; i test termici sono applicabili a quasi tutte le tipologie di passante. Tra le indicazioni fornite dalla norma IEC 60137 8.7.2 vi è quella di immergere nell'olio o in un altro isolante liquido a temperatura ambiente uno o due estremità del passante e, quella di mantenere la temperatura dell'olio dei passanti per i trasformatori alla temperatura di 60 gradi kelvin sopra quella dell'aria.

I passanti caratterizzati da un conduttore disposto nel tubo centrale devono essere opportunamente assemblati; la sezione trasversale deve essere conforme a quanto indicato dalle norme. L'olio del trasformatore, se presente, non deve superare un terzo della parte esterna. I terminali dei passanti devono essere immersi in un gas isolato alla minima pressione poiché quest'ultimo si trova alla temperatura ambiente durante la fase iniziale. Per i passanti operanti con un isolamento in aria, il lato in aria deve essere chiuso in una camera appropriata. Durante

il test è necessario che la temperatura dell'aria della camera sia mantenuta alle temperature di 40°K sopra la temperatura ambiente.

La misura si effettua attraverso un elevato numero di termocoppie le quali, se possibile, vengono distribuite lungo il conduttore del passante e sulla flangia ( o altri punti fissi), in modo da determinare i punti più caldi delle parti metalliche del passante in contatto con il materiale isolante. Una lettura soddisfacente della temperatura è fornita da termometri posizionati nell'involucro dell'olio con ogni 0.5l di volume. La norma indica il corretto posizionamento dei termometri i quali, devono trovarsi alla distanza di 30 cm dal passante e 3 cm sotto la superficie dell'olio.

La determinazione della temperatura in condizioni operative differenti dalle condizioni standard si esegue attraverso modelli equivalenti. L'ottimo per valutare il fenomeno di distruzione dell'isolamento nel caso di sovratemperatura è quello di determinare il punto più caldo del passante attraverso un modello matematico. La temperatura massima del conduttore è determinabile dalla seguente relazione fornita dalla norma.

$$\theta_M = \frac{[3 \cdot (\vartheta_a + \frac{R_c}{R_a \cdot \alpha}) - (\frac{3}{\alpha}) - \vartheta_1 - \vartheta_2]^2 - (\vartheta_1 \cdot \vartheta_2)}{3 \cdot [2(\vartheta_a + \frac{R_c}{R_a \cdot \alpha}) - (\frac{2}{\alpha}) - \vartheta_1 - \vartheta_2]}; \dots \text{eq2.3.1}$$

$$M = \left[ 3 * \left( \frac{R_c}{R_a} \cdot \frac{1}{\alpha} + \vartheta_a \right) - \frac{3}{\alpha} - \vartheta_1 - \vartheta_2 \right] - \vartheta_M; \dots \text{eq2.3.2}$$

$$L_M = \frac{L}{1 + \sqrt{\frac{(\vartheta_M - \vartheta_2)}{(\vartheta_M - \vartheta_1)}}}; \dots \text{eq2.3.3}$$

Dove:

- $\theta_1$ : temperatura misurata al punto più freddo del conduttore [°C];
- $\theta_2$ : temperatura misurata al punto più caldo del conduttore [°C];
- $\alpha$ : coefficiente di temperatura del conduttore con resistenza  $R_a$ ;
- $\theta_a$ : temperatura uniforme di riferimento del conduttore [°C];
- $\theta_M$ : temperatura massima del conduttore [°C];
- $L$ : lunghezza del conduttore [m];
- $L_M$ : distanza tra il punto più freddo e quello più caldo del conduttore [m];

- $R_A$ : resistenza misurata tra i due estremi del passante alla temperatura  $\theta_a$ ; [ $\Omega$ ];
- $R_C$ : resistenza del conduttore alla temperatura di misura [ $\Omega$ ];

Il valore massimo della temperatura è strettamente legato al coefficiente M. Si distinguono due casi:

- $M > 0$ , Il valore di temperatura massima nel conduttore coincide con  $\theta_M$ ;
- $M < 0$ , Il valore di temperatura massima nel conduttore coincide con  $\theta_2$ ;

Infine, dopo aver determinato la temperatura massima si specifica la posizione del punto caldo attraverso l'eq.2.3.3.

Il passante AT supera i test di temperatura quando i risultati ottenuti sono inferiori ai limiti indicati dalla norma IEC 60137-4.8 inoltre, non devono presentarsi evidenti danni visivi nell'apparecchiatura. La corrente di test non viene scelta arbitrariamente ma, la norma IEC 62199 fornisce le relazioni base per il calcolo. La corrente di test varia in relazione al campo di applicazione del passante; nel caso in cui debba sostenere una corrente continua allora la corrente di prova non deve essere inferiore a quella nominale in DC. Se non fosse possibile una sorgente in corrente continua sarebbe possibile utilizzare una sorgente AC a 50Hz. In questo caso la corrente di test si ricava dalla seguente relazione:

$$I_{testac} = \sqrt{I_{dc}^2 \cdot \frac{R_{dc}}{R_{ac}}}; \dots \dots \dots \text{eq.2.3.4}$$

Mentre per i passanti che devono sostenere una corrente alternata, la norma fornisce le seguenti relazioni:

$$I_{eqac} = \sqrt{\sum_h (I_h^2 \cdot k_h)}; \dots \dots \dots \text{eq.2.3.5}$$

Pertanto, la corrente di test:

$$I_{test} = \sqrt{I_{eqac}^2 \cdot \frac{R_{dc}}{R_{ac}}}; \dots \dots \dots \text{eq.2.3.6}$$

Si ritiene opportuno riportare, a scopo illustrativo, gli andamenti del flusso termico Q e della temperatura in relazione alla coordinata x (lunghezza del passante). Per tracciare gli andamenti del flusso termico è necessario fare riferimento alla relazione eq.2.3.7.

$$Q = r \cdot I^2 \cdot (L_m - x); \dots \dots \dots \text{eq.2.3.7}$$

Dove:

- Q: flusso termico [J/s];
- r: resistenza per unità di lunghezza [ $\Omega/m$ ];
- I: corrente di prova [A];
- $L_m$ : distanza tra il punto più freddo e quello più caldo del conduttore [m];
- x: coordinata di riferimento [m];

Si esprime infine il flusso termico Q in funzione alla distribuzione della temperatura:

$$Q = c \cdot S \cdot \frac{d\theta}{dt} \dots \dots \dots \text{eq.2.3.8}$$

Dove:

- c: Conduttività del conduttore [S/m];
- S: Sezione del conduttore [ $mm^2$ ];
- $d\theta$ : Variazione infinitesima di temperatura;

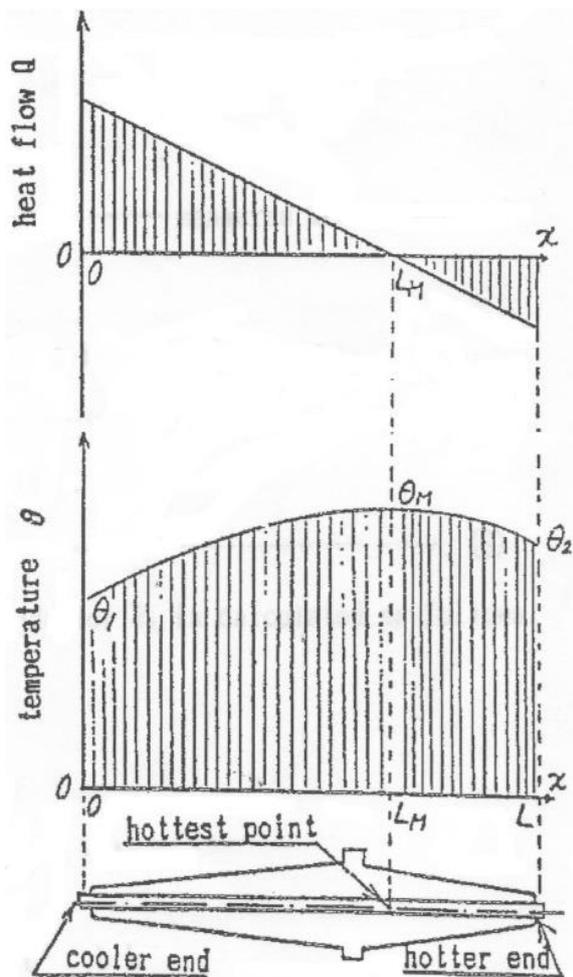


Figura 2.9.1. Andamenti del flusso termico e della temperatura in relazione alla coordinata  $x$

Dai grafici si evidenzia l'andamento lineare e decrescente del flusso termico. Quest'ultimo assume valori positivi e negativi e si annulla in corrispondenza alla lunghezza per la quale si ha il punto a temperatura massima.

Le relazioni precedenti sono valide solo sotto l'ipotesi di passante di piccole dimensioni dove vengono trascurate le dissipazioni radiali. Questo metodo non consente una ottima applicazione pratica ai giorni d'oggi; lo sviluppo dei passanti AT ha portato alla realizzazione di strutture di notevoli dimensioni. Un altro punto critico delle formule precedenti è la validità delle stesse esclusivamente per i passanti ad isolamento solido. Quest'ultimo viene spesso sostituito da gas isolanti come l'idrogeno o l' $\text{SF}_6$ .

### 2.3.1. Metodi di studio per il calcolo della distribuzione di temperatura.

Come descritto precedentemente in aggiunta agli stress elettrici e meccanici un isolatore passante è soggetto ad elevati stress termici a causa della corrente che attraversa i conduttori. Come indicato dalla norma IEC 60137 l'isolatore deve soddisfare una serie di requisiti termici. Per affrontare il problema della distribuzione della temperatura vi sono innumerevoli metodi che ne permettono la risoluzione analitica e grafica. Il metodo più usato per risolvere le equazioni di bilancio termico dovute alla non linearità dei fenomeni relativi a un passante AT è il metodo degli elementi finiti. La distribuzione della temperatura può essere calcolata in maniera più o meno complessa, si preferisce una soluzione a regime stazionario per ottenere un risultato più rapido ma comunque coerente ai fenomeni. In questo paragrafo rivedremo la formulazione matematica descritta precedentemente ma le equazione che descriveranno il

modello saranno differenziali. In primis è necessario fornire il modello elettrico dell'isolatore. Il circuito equivalente si rappresenta come:

- Il conduttore rappresenta la fonte di calore a causa delle perdite di potenza attiva dovuta alla circolazione delle correnti.
- L'involucro dell'isolatore è considerato sia un mezzo elettrico che termico.

L'energia associata alla dissipazione per effetto Joule è la principale fonte di calore in un conduttore, questa può essere espressa come:

$$dq = r \cdot i^2 \cdot dt \dots \dots \dots \text{eq.2.3.9}$$

Dove:

- dq : Quantità infinitesima di energia convertita in energia termica [W\*s];
- i : Corrente elettrica che circola nel conduttore [A];
- r : Resistenza del conduttore [ $\Omega$ ];
- dt : Intervallo di tempo infinitesimo [s];

L'energia termica si distribuisce dalla sorgente di calore (conduttore) fino all'ambiente esterno attraverso la porcellana. L'equazione differenziale che tiene conto del fenomeno di distribuzione è:

$$\nabla(k\nabla T) + W = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \dots \dots \dots \text{eq.2.4.0}$$

Dove:

- k: Conduttività termica [W/(m\*°K)];
- T: Temperatura [°K];
- W: potenza per unità di volume [W/m<sup>3</sup>];
- $\rho$ : Densità del materiale [Kg/m<sup>3</sup>];
- c: Capacità termica del materiale [J/kg\*°K];
- t: Tempo [s];

Considerando valida l'ipotesi precedente si elimina il termine derivativo dalle equazioni appena descritte. Il metodo agli elementi finiti richiede come dati di input alcune proprietà del materiale. I principali valori da definire sono: conduttività termica, capacità termica dell'aria e del materiale dell'isolatore. Alcuni parametri sono fortemente dipendenti dalla temperatura e

questa dipendenza, di norma, non è lineare. In questo genere di studi si trascura, inoltre, il riscaldamento della flangia per induzione a causa delle correnti parassite. Per definire le condizioni al contorno del sistema si impone un valore costante di temperatura applicato alla superficie della flangia ottenuto come studio sperimentale. Un altro fattore che aumenta la difficoltà di calcolo della temperatura è il raffreddamento convettivo poiché richiede la determinazione di molti parametri per essere quantificato. In figura è rappresentato un caso generico di distribuzione della temperatura all'interno del passante.

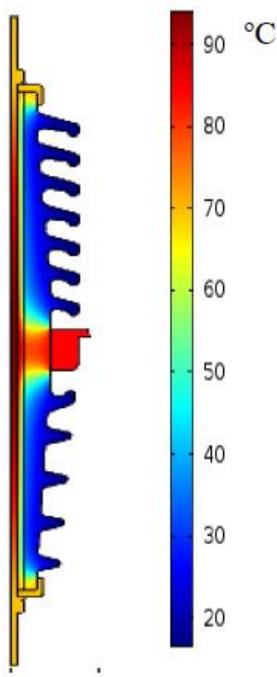


Figura 7. Distribuzione della temperatura interna ad un passante

In figura è mostrata la distribuzione tipica della temperatura all'interno di un passante alta tensione. Si evidenzia come la temperatura si accumula al centro del passante, a causa del surriscaldamento della flangia. Si osservano, inoltre, dei piccoli stress termici lungo la porcellana a causa della sue buone proprietà termiche. È noto che l'effetto pelle, soprattutto alle alte frequenze, è caratterizzante per i conduttori che trasportano corrente. Non essendo uniforme la distribuzione della corrente elettrica nel conduttore allora anche la distribuzione della temperatura sarà disomogenea. A causa dell'effetto pelle si avrà una variazione di densità di corrente nel conduttore del passante visibile da una sezione trasversale dello stesso.

## 3. Caso pratico

### 3.1 Introduzione.

L'analisi online dei passanti alta tensione dei trasformatori è stata svolta durante l'attività di tirocinio e tesi in azienda. Lo scopo del presente elaborato è quello di valutare e individuare la strumentazione più affidabile ed efficiente per la misura delle capacità e del fattore  $\tan(\delta)$  caratterizzanti la bontà del bushing. Inoltre, sono stati esaminati i fenomeni di scariche parziali con l'individuazione di quest'ultime nel passante o negli avvolgimenti del trasformatore. L'attività svolta si è concentrata sull'analisi dei dati acquisiti dalle apparecchiature confrontandoli innanzitutto con la realtà fisica dei fenomeni descritti nei capitoli precedenti. Successivamente i dati sono stati esaminati per determinare lo stato di salute dei passanti alta tensione dei trasformatori.

Verranno descritti e confrontati tre sistemi di monitoraggio online appartenenti ciascuno a compagnie differenti. Per motivi pubblicitari e di copyright durante la stesura dell'elaborato le aziende fornitrici saranno denominate: "Azienda1", "Azienda2" e "Azienda3". Per una corretta analisi di tipo tecnica-economia è necessario descrivere la strumentazione utilizzata a livello hardware e software specificandone i rispettivi vantaggi e svantaggi. Nella realtà pratica i sistemi hardware e software sono molto simili tra loro e differiscono solo di alcuni dettagli che possono rilevarsi caratterizzanti per un'analisi tecnica.

Si ritiene opportuno descrivere, a monte dell'apparecchiatura di analisi, i trasformatori e i passanti dove il sistema è installato.

### 3.2. Azienda1: caratteristiche dei trasformatori e passanti.

L'apparecchiatura fornita dall'Azienda1 è installata su un trasformatore elevatore avente le seguenti caratteristiche nominali:

#### Trasformatore1

$S_n = 370 \text{ MVA}$

$V_{1n} = 400 \text{ kV}$

$V_{2n} = 20 \text{ kV}$

$I_{1n} = 534 \text{ A}$

$f_n = 50 \text{ Hz}$

$Z_{cc\%} = 13.54 \%$

Collegamento:

AT: A stella con neutro  
esterno

BT: A triangolo

I passanti montati in questa macchina sono i seguenti:

- Passanti BT di tipo GOH;
- Passanti AT di tipo GOEK;

I passanti di tipo GOH con controllo di campo si caratterizzano per un isolamento con carta impregnata in olio. Il design principale del passante è mostrato in figura 3.1. Il conduttore è costituito da un cilindro in alluminio dove, sul lato dell'olio è posta la flangia di raffreddamento. Le superfici dei collegamenti, i terminali lato aria e lato olio sono placcati con una lega zinco/stagno. I passanti di tipo GOH sono dotati di test tap collegato allo strato esterno del condensatore. Il test tap può essere utilizzato per controllare l'isolamento del passante attraverso le misure di capacità e fattore di dissipazione. La tensione massima ammissibile dalla presa capacitiva è 2kV per un tempo di un minuto alla frequenza di 50Hz. Nelle figure seguenti è rappresentato il design principale del passante e dei suoi elementi caratteristici.

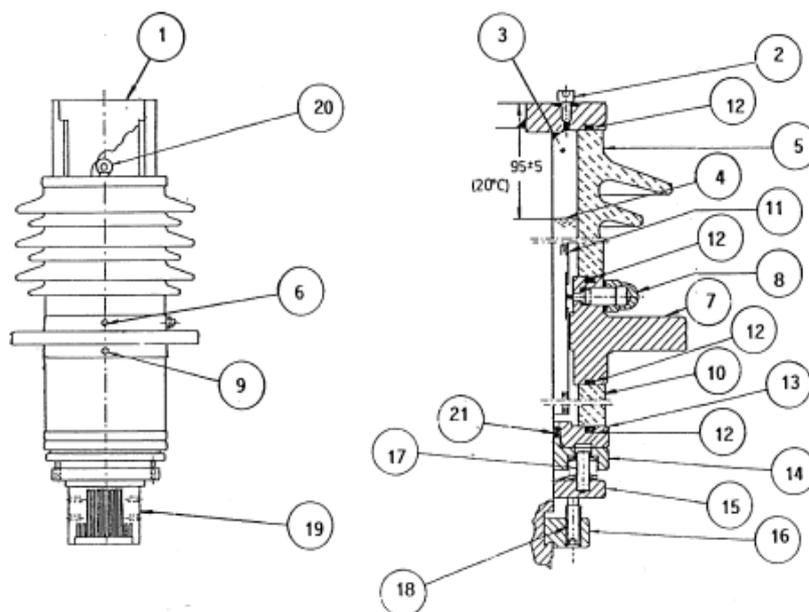


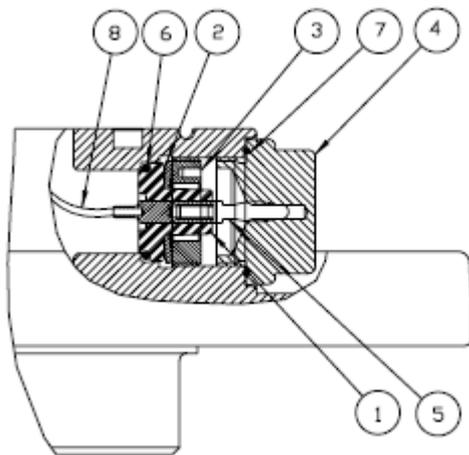
Figura 3.1. Design principale del passante GOH.

Dove:

- |  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. Piastre terminali esterne.              | 12. Sigillo           |
| 2. Tappo di sfiato e riempimento dell'olio | 13. Piastra inferiore |
| 3. Spazio di espansione                    | 14. Anello di guardia |
| 4. Olio                                    | 15. Anello inferiore  |

- 5. Isolatore in porcellana
- 6. Tappo olio lato aria
- 7. Flangia di montaggio
- 8. Test tap
- 9. Tappo lato olio
- 10. Isolatore in porcellana
- 11. Corpo del condensatore

- 16. Anello di bloccaggio
- 17. Dispositivo a molla
- 18. Viti di bloccaggio
- 19. Terminale lato olio e flangia
- 20. Anello di sollevamento
- 21. Sigillo radiale



- 1. Passante per il test tap
- 2. Molla a disco
- 3. Dado
- 4. Cover
- 5. Pin di contatto
- 6. Anello
- 7. Anello
- 8. Conduttore

Figura 3.2. Design del test tap.

Il collegamento verso terra del test tap deve essere sempre garantito a causa del limitato valore della capacità  $C_2$  associato a quest'ultimo. Evitandone, pertanto, il funzionamento a circuito aperto. La misurazione della capacità si effettua immediatamente dopo il montaggio attraverso il terminale esterno e il test tap utilizzando un connettore fornito dal costruttore stesso. Con il trasformatore disalimentato e i terminali in uscita del passante disconnessi si procede alla rimozione del tappo del test tap. Il sistema di misurazione è collegato al test tap mentre la sorgente di prova è collegata ai terminali del passante. La capacità  $C_1$  è misurata tra il tubo centrale e il test tap mentre la capacità  $C_2$  tra il test tap e la terra. I valori nominali di queste capacità sono riportati nei dati di targa e per il caso in esame avremo:

Tipologia passante	$C_1$ [pF]	$C_2$ [pF]
GOH 170/10	400	415
GOH 170/16	570	510
GOH 170/25	765	540

Le proprietà tecniche del passante sono direttamente correlate alle variazioni di temperatura dello stesso; la norma CEI predispone dei fattori correttivi per la misurazione del parametro  $\tan(\delta)$ .

Temperatura del passante [°C]	Fattori correttivi
3-7	0.85
8-12	0.90
13-17	0.95
18-22	1
23-27	1.05
28-32	1.10
33-37	1.15
38-42	1.2

La struttura principale di un passante di tipo GOEK, indicata dalla guida tecnica 1ZSE/2750106 è mostrata in figura 3.3.

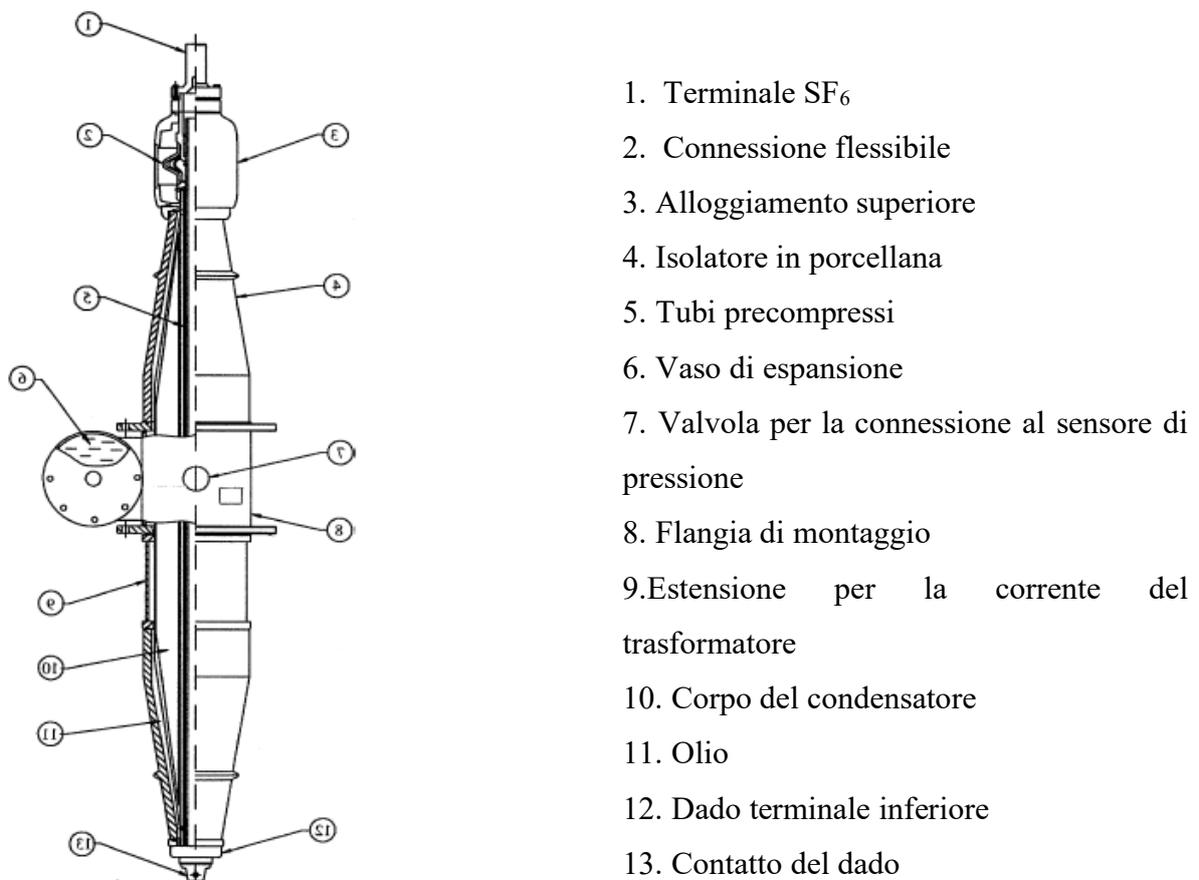
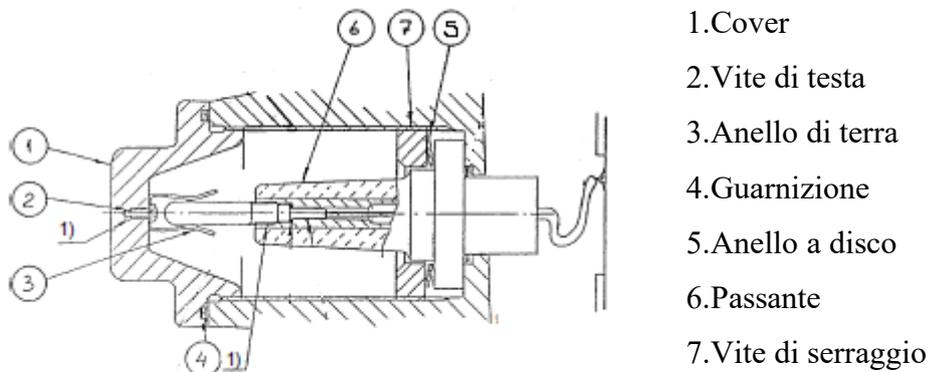


Figura 3.3. Design principale di un passante di tipo GOEK

Come i passanti descritti precedentemente anche quest'ultimi sono dotati del test tap per la valutazione dello stato di isolamento del passante attraverso il calcolo delle capacità e del fattore di dissipazione. In figura 19 è riportato il design del test tap per le misurazioni online.



1. Cover
2. Vite di testa
3. Anello di terra
4. Guarnizione
5. Anello a disco
6. Passante
7. Vite di serraggio

Figura 3.4 .Design test tap di un passante di tipo GOEK.

Il normale funzionamento di un passante alta tensione deve essere conforme alle norme IEC/IEEE, le quali impongono determinate condizioni operative; nel caso in esame:

<b>Temperatura operativa</b>	+40 a -40 °C valore minimo di temperatura indicato dalla IEC137
<b>Altitudine</b>	<1000m
<b>Tipo di mezzo isolante</b>	Olio per trasformatori. Temperatura giornaliera media massima 90°C Temperatura massima temporanea 115°C
<b>Pressione massima</b>	100kPa

Il rispetto delle prescrizioni normative garantisce il corretto funzionamento del passante e il rispetto della vita utile prestabilita.

### 3.2.1 Apparecchiatura fornita e installata dall'azienda1.

Il sistema di diagnostica, fornito dall'azienda1, permette di acquisire i principali dati caratterizzanti il trasformatore e di fornire, attraverso un'interfaccia Web, opportuni segnali di avviso nel caso in cui i valori registrati eccedano dei limiti preimpostati. Il sistema di monitoraggio on-line, costituito da un'unità elettronica e da trasduttori da installare sulle prese

capacitivi dei passanti, deve avere le seguenti caratteristiche tecniche minime previste dall'azienda:

- Campionare la singola corrente capacitiva di ogni passante, registrare la forma d'onda e ricavare il valore rms ed il relativo angolo di fase con le seguenti precisioni:
  - Ampiezza rms  $< \pm 1\%$  ;
  - Angolo di fase  $\leq 0.01^\circ$  ;
- Visualizzare i valori rms e relativi angoli di fase, e, in aggiunta, calcolare e visualizzare la somma fasoriale dei valori di corrente
- Ingressi di corrente dalle prese capacitive fino a 300mA
- I trasduttori installati sulle prese capacitive dei passanti devono avere delle protezioni interne, non ripristinabili, che garantiscano la messa a terra ed in corto circuito della presa capacitiva in caso di qualsiasi problema all'unità elettronica
- Ricavare il valore di capacità e tandelta di ogni passante
- Possibilità di avere ingressi di tensione per calcolare il valore di capacità e tandelta, utilizzando anche una sincronizzazione temporale per avere un valore "vero" di capacità e tandelta di ogni passante- includendo una scalatura e un offset definibili dall'utente per l'ampiezza e la fase della tensione di riferimento.
- Disporre di 3 livelli di allerte, tutti definibili dall'utente, basati sui livelli di rms della corrente, della capacità e del tandelta.
- Tutte le allerte si devono basare sia sui valori assoluti dei parametri sia sulle variazioni in percentuale degli stessi, rispetto ad un valore configurato dall'utente; entrambi i tipi di allerte devono essere disponibili e funzionare contemporaneamente.
- Tutte le allerte devono avere la funzionalità "Immune dai disturbi", cioè la capacità del sistema di considerare valide un numero definito di misure sopra una soglia impostata dall'utente prima di generare un allarme.
- Avere un Sistema Esperto per l'analisi della capacità e la somma delle correnti capacitive, basato su variazioni giornaliere, settimanali e mensili, capace di generare 3 livelli di allarme per ogni analisi, basata sia sui dati di targa sia sugli ultimi valori delle misure off-line.

- Potere acquisire misure fino ad almeno 6 passanti, con 3 ingressi di tensione (per riferimento)
- L'interfaccia utente deve visualizzare la forma d'onda delle correnti misurate, la tabella dei dati misurati e dei parametri derivati e le eventuali allerte relative ad ogni periodo visualizzato
- L'interfaccia utente deve essere web built-in, senza software proprietario; deve essere possibile definire almeno 3 livelli di utenti: Amministratore, Operatore e Visitatore. Ciascun profilo deve essere protetto da password.
- La memorizzazione dei dati deve essere definibile dall'utente, con intervallo minimo pari a 1 minuto
- Deve avere protocolli di comunicazione standard, inclusi Modbus, DNP 3 sia su RS485 sia su Ethernet e IEC61850
- Il sistema deve avere livello di isolamento degli ingressi di misura di almeno 2500V RMS per 1 minuto
- Il sistema deve essere conforme alle seguenti norme per l'ambiente in cui viene utilizzato ANSI/IEEE C37.90.1 e ESD EN 61000-4-2

Le indicazioni precedenti devono essere rispecchiate da tutti i sistemi di monitoraggio on-line forniti dalle tre aziende in esame.

Il sistema di controllo necessita di un'alimentazione nominale a 24V in corrente continua a 1A. È possibile installarlo su una qualsiasi rete AC e DC attraverso un adattatore universale fornito dall'azienda. Per il corretto funzionamento del sistema il costruttore fornisce le seguenti specifiche hardware:

**Temperatura operativa:** -20°C a 50°C

**Temperatura di mantenimento:** -20°C a 70

**Umidità relativa:** 0% a 95%

LED per l'indicazione di potenza

Nel modulo principale sono presenti degli indicatori che forniscono l'informazione sullo stato del sistema in analisi.

**Colore indicatore**

**Azione**

**Evento**

Rosso

AZIONE

Un evento misurato richiede un intervento immediato.

Giallo	ALLARME	Un evento misurato richiede un'analisi dettagliata.
VERDE	INFO	Un evento misurato fornisce solo un'informazione
BLU	STATO	Indica che il dispositivo funziona correttamente.

Durante il normale funzionamento devono essere attive le indicazioni verdi e blu.

Il sistema di comunicazione online tra il dispositivo e l'interfaccia è di tipo Ethernet attraverso le porte 10/100/1000. Per i PC la connessione avviene attraverso un Modbus TCP server. Si ha, inoltre, la possibilità di collegare un dispositivo esterno di tipo USB per scaricare dati o per installare aggiornamenti del software.

Di seguito è rappresentato un modulo comprendente tutti i connettori dell'unità principale.

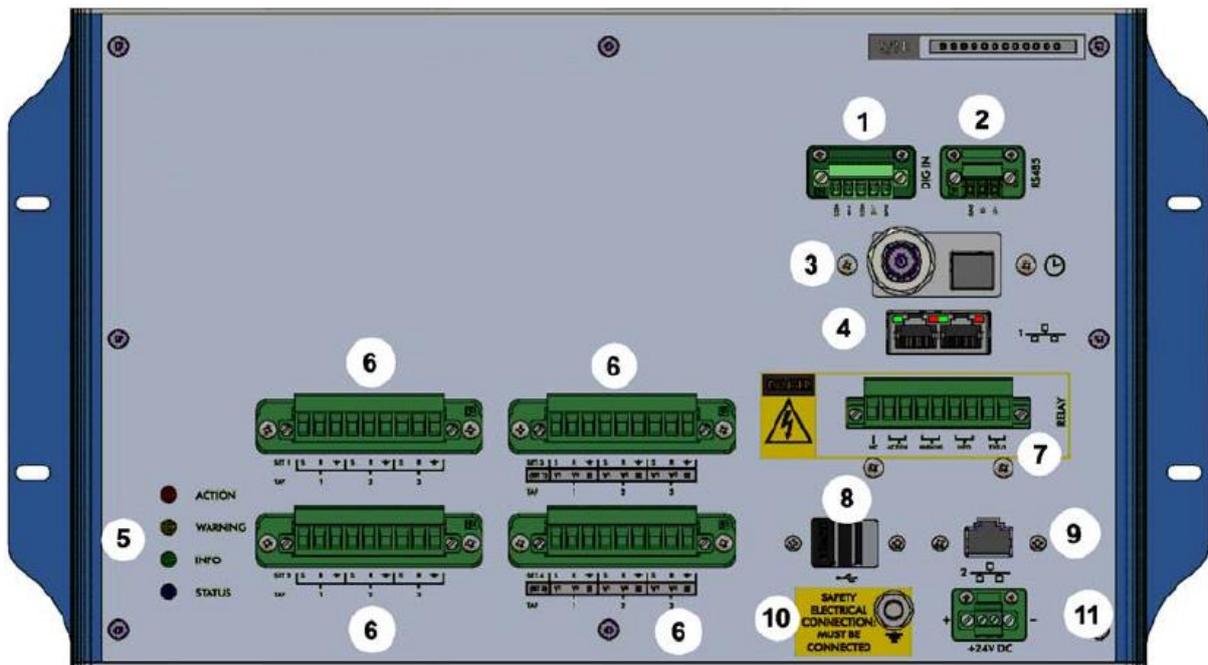


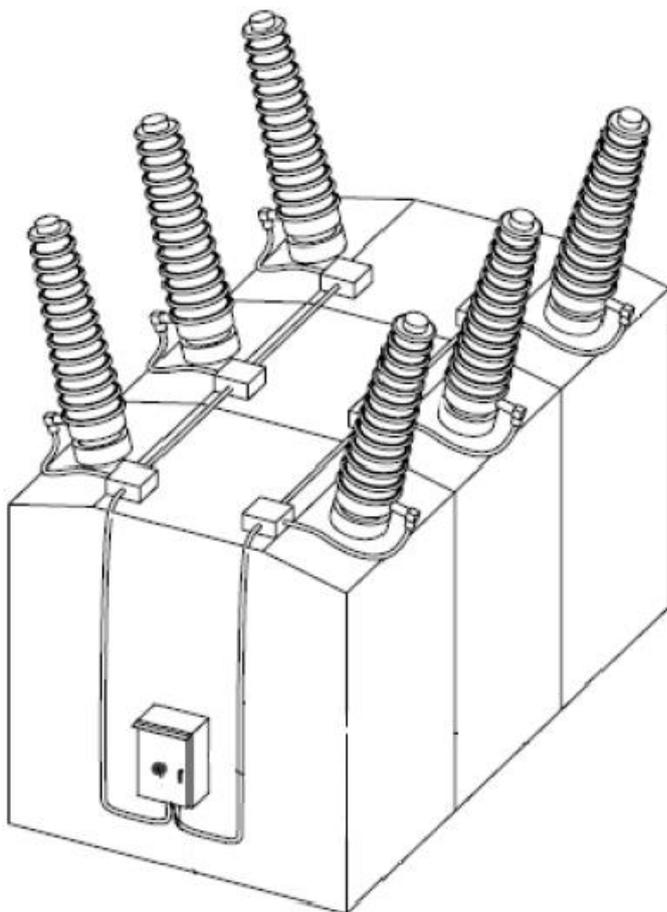
Figura 8. Modulo principale Aziendal

Dove:

- |                        |                                      |
|------------------------|--------------------------------------|
| 1. Input digitali      | 7. Relay output                      |
| 2. Modbus              | 8. Connessioni USB                   |
| 3. IRIG timing input   | 9. Porta di comunicazione            |
| 4. Ethernet switch     | 10. Connessione a terra di sicurezza |
| 5. Indicatori          | 11. Ingressi di potenza              |
| 6. Connessioni sensori |                                      |

La corretta installazione impone il collegamento del case a terra. La guida tecnica indica la connessione generica a terra della custodia. In figura 3.6 è riportato uno dei possibili collegamenti del sistema di controllo. In questo caso è installato su un trasformatore trifase dove il monitoraggio avviene sia nel lato alta tensione che bassa tensione.

La protezione è garantita da dei blocchi di cortocircuito composti da singoli segmenti che possono collegare o disconnettere un circuito. Ogni sensore ha una connessione a tre fili e pertanto è necessario costituire ogni blocco di cortocircuito con tre segmenti per ciascun sensore del passante. Ogni set è formato da tre sensori, quindi è necessario avere nove segmenti di blocco per ogni set di tre sensori. I segmenti sono infine montati su una guida fissata alla parete della custodia del blocco di sicurezza. I blocchi di cortocircuito sono posti in una cassetta separata rispetto al modulo indicato precedentemente.



Durante il funzionamento ordinario il blocco di cortocircuito deve essere aperto. Nel caso in cui il circuito sia incompleto il blocco deve essere spostato nella posizione di chiusura. I test tap dei passanti devono essere collegati a terra attraverso il blocco di cortocircuito chiuso. Il collegamento al potenziale di riferimento è garantito anche nella posizione di apertura attraverso il modulo di controllo. Il sistema permette la misura delle correnti di dispersione per sei passanti.

Figura 3.6. Configurazione generica dell'apparecchiatura di analisi.

È necessario, come conseguenza, l'utilizzo di sei ingressi di corrente e di tensione cablati opportunamente attraverso un trasformatore amperometrico o voltmetrico sullo stesso bus del passante.

### 3.2.2 Acquisizione dati

Le principali grandezze di riferimento vengono rilevate attraverso opportuni sensori posizionati nei passanti alta tensione della macchina; mediante uno specifico conduttore i segnali vengono trasferiti al sistema di monitoraggio, il quale li converte trasferendoli all'interfaccia grafica. La situazione descritta precedentemente è facilmente riassumibile dallo schema a blocchi in figura.



L'apparecchiatura installata garantisce la misura online della capacità e del fattore di dissipazione  $\tan(\delta)$  per ogni passante. Non è presente alcun sistema per le misure ad alta frequenza e, pertanto, non è possibile la determinazione delle scariche parziali. Il sensore inserito nella presa capacitiva del passante è il fulcro della misurazione online. Quest'ultimo, rappresentando uno dei pochi elementi caratteristici dell'apparecchiatura, riveste un ruolo fondamentale per la classificazione dei sistemi.

Il circuito di misura fornito è composto come segue in figura

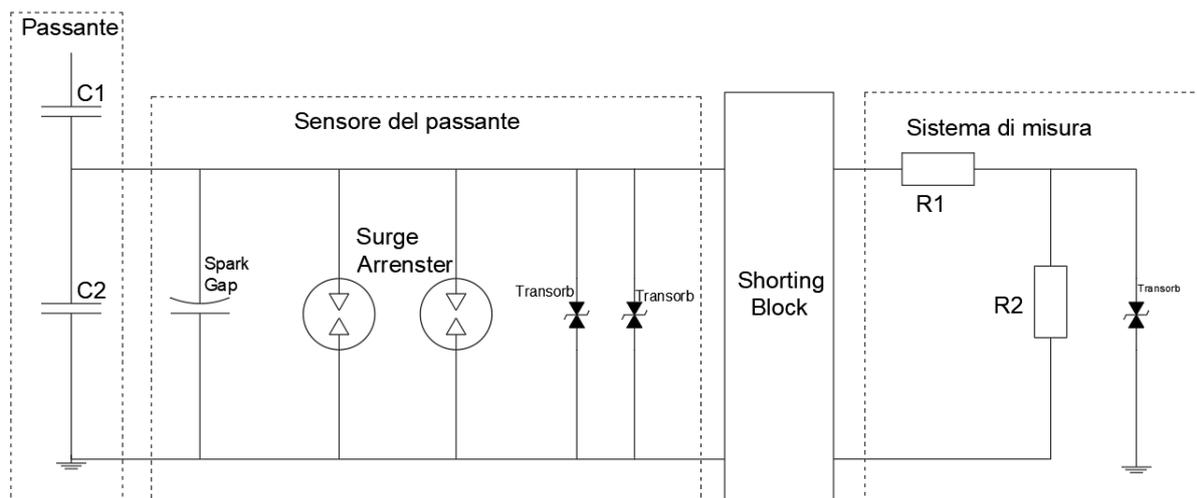


Figura 3.7. Schema circuitale del sistema di misura.(RIFARE)

Dove:

- Spark gap: Spinterometro (Qn:1500VAC);

- Surge arrester: scaricatore di sovratensione composto da due transistor;
- Transorb: Dispositivo di protezione;
- Shorting Block: Dispositivo di protezione automatico;
- R1,R2: resistenze del circuito di misura;
- C1: Capacità equivalente del passante;
- C2: Capacità tra flange e potenziale di terra;

La caratteristica di quest'adattatore è l'elevato numero di dispositivi di protezione. Sono presenti: uno spinterometro, due scaricatori di sovratensione e due transorb. Il transorb è un dispositivo con due terminali e, per funzionare deve essere polarizzato direttamente. Il suo compito è quello di limitare la tensione fino ad un valore prestabilito. In condizioni stazionarie l'adattatore fissa la tensione della presa capacitiva a 13V. Vengono utilizzati due transorb e due scaricatori di tensione per garantire ridondanza nel sistema. Il sensore è applicato in parallelo alla capacità C<sub>2</sub> del passante. A valle del sensore si trova l'apparecchiatura per la misura della capacità e del tan( $\delta$ ).

L'azienda produttrice fornisce, su richiesta, un sistema per la misura delle scariche parziali all'interno dei passanti alta tensione dei trasformatori, delle macchine rotanti e nei conduttori. La misurazione è garantita attraverso una serie di sensori; un'antenna per le PD ( Partial Discharge), connettori per il passante, trasformatori di corrente e una sonda per applicazioni interne al serbatoio. L'apparecchiatura permette la misurazione di onde alle radio frequenze (RF), alte frequenze (HF), altissime frequenze (VHF) e ultraalte frequenze (UHF).

La presenza di sensori permette di inviare un allarme nel caso in cui i valori di input eccedano i limiti preimpostati. Vengono generati due tipi di allarmi:

-Allarmi sulle conduzioni dello strumento;

-Allarmi, per ogni canale, sullo stato di avviso calcolato dal valore di corrente e tenendo conto dei valori PAPR registrati precedentemente.

Viene, inoltre, calcolato uno stato di allerta globale del singolo canale. Il livello di allerta viene fortino attraverso un LED posizionato nel pannello frontale.

Lo strumento permette la scansione dei suoi canali in sequenza. La misura di un segnale di tipo VHF necessita di circa 60 secondi mentre, per un segnale di tipo HF l'apparecchiatura impiega circa 5 minuti. Ogni canale può essere configurato per disalimentare alcuni sensori e canali

inutilizzati in modo da diminuire il tempo di scansione. Una volta completa, i dati vengono forniti attraverso il Modbus. I risultati si presentano come:

-PAPR (Peak to average power): Indica la presenza di scarica parziali nel sistema misurato.

-Ipwr (Integrated power): Indica il livello di energia associato alle scariche parziali.

### 3.2.3. Struttura software

Il sistema di monitoraggio delle risorse energetiche dei passanti del trasformatore offre un modo dettagliato e consolidato per valutare lo stato di salute di quest'ultimi. Il sistema non si presenta come un'applicazione da installare nel proprio personal computer ma come un'interfaccia online raggiungibile da qualsiasi device se opportunamente configurato. L'unico requisito software è la presenza di un browser.

In figura 3.8 è mostrato il sistema di interfaccia.

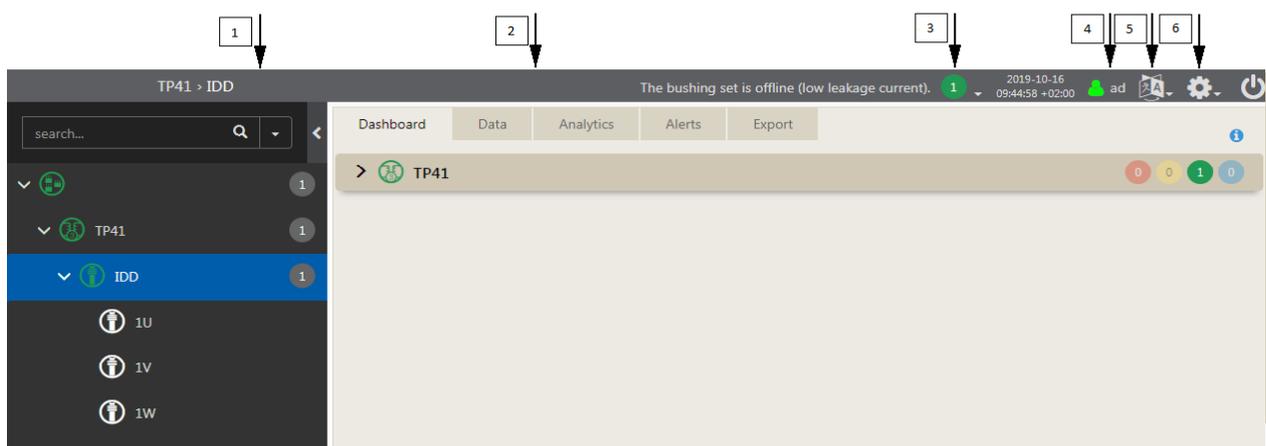


Figura 3.8. Schermata principale software azienda

La schermata principale si mostra semplice e intuitiva. Nella sezione indicata con il numero 1 si possono visualizzare i seguenti contenuti:

-Asset tree: Si visualizza nella home page del sistema ed elenca tutte le risorse, i monitor associati e i canali che sono collegati all'apparecchiatura di monitoraggio.

-Riquadro di navigazione: Fornisce i vari collegamenti per le finestre di configurazione

-Menu search: Permette di cercare direttamente una risorsa o un canale.

La sezione due permette la visualizzazione dei dati forniti dal sistema. In particolare, i dati tabulari, grafici e analisi. Di seguito sono rappresentate due schermate che mostrano i vari dati acquisibili durante il monitoraggio.

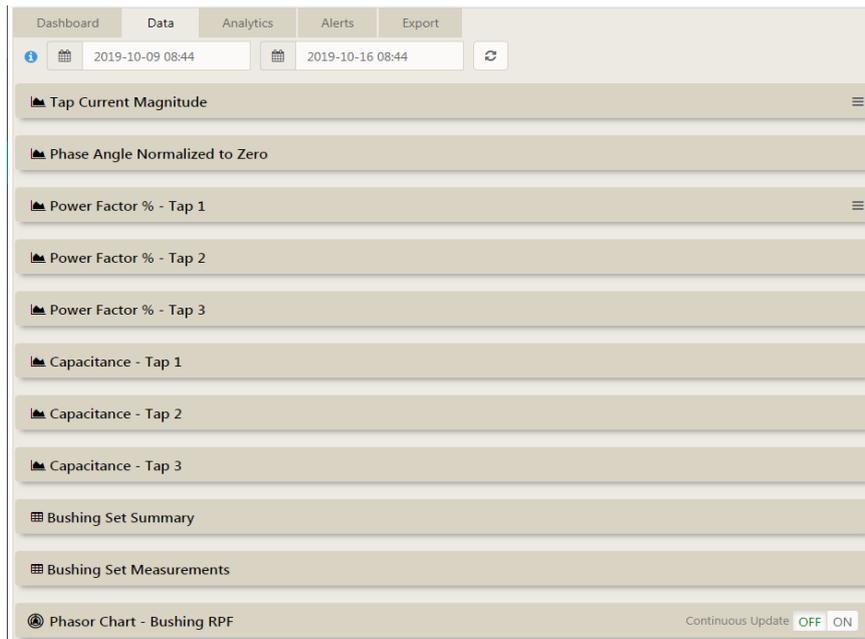


Figura 3.9. Principali dati acquisibili dal sistema.



Figura 3.9.1. Andamento della leakage current.

La sezione 3 mostra un'icona di allerta. Il colore indica il livello di allarme e un testo parziale indica le allerte verificatesi precedentemente. Selezionando una categoria si apre una finestra contenente tutta la lista di allarmi. Occorre puntualizzare che l'ora e la data a cui è associato un allarme non coincide con quella del computer locale ma corrisponde a quella del server utilizzato. La sezione 4 indica l'utente connesso al sistema online di controllo. La sezione 5 e 6

corrispondono rispettivamente alle impostazioni relative alla lingua e alle impostazioni di sistema.

Dalla sezione 2 attraverso il comando “Export” si ha la possibilità di esportare i dati acquisiti in un certo intervallo di tempo. L’esportazione avviene semplicemente selezionando un determinato periodo e cliccando sul tasto “Export”. In automatico si avvierà un download di un file di tipo Excel che permette la visualizzazione dai dati anche offline.

### 3.3. Azienda2: caratteristiche dei trasformatori e passanti.

L’apparecchiatura fornita dall’Azienda2 è installata su due trasformatori elevatori aventi le seguenti caratteristiche nominali:

#### Trasformatore2 (Centro)

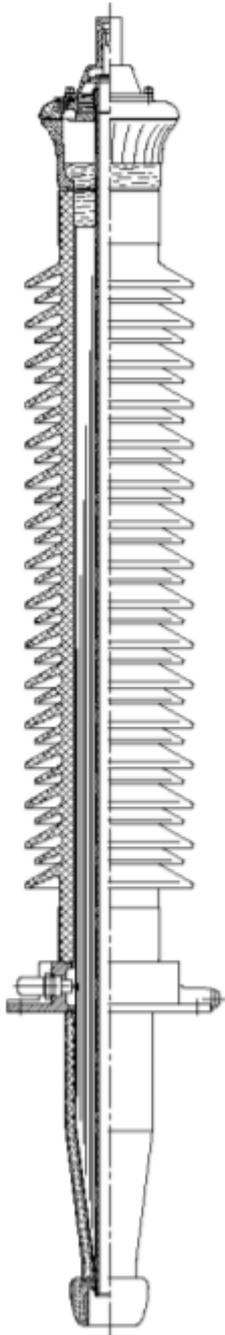
$S_n = 63 \text{ MVA}$	$V_{AT} = 220 \text{ kV}$	$V_{bt} = 23 \text{ kV}$
$I_{ATn} = 165.33 \text{ A}$	$f_n = 50 \text{ Hz}$	$V_{cc\%} = 13\%$
Collegamento:	AT: A stella	
Gruppo: 0	BT: A stella con neutro	
Raffreddamento	ONAN	

#### Trasformatore3 (Martinetto)

$S_n = 63 \text{ MVA}$	$V_{AT} = 230 \text{ kV}$	$V_{MT} = 23.2 \text{ kV}$
$I_{ATn} = 158.1 \text{ A}$	$f_n = 50 \text{ Hz}$	$V_{cc\%} = 13.5\%$
Collegamento:	AT: A stella con neutro	$P_0 = 29.5 \text{ kW}$
Gruppo: 0	BT: A stella con neutro	$P_{cc} = 230 \text{ kW}$
Raffreddamento	ONAN	

I passanti installati in questa macchina sono del tipo:

Lato AT:

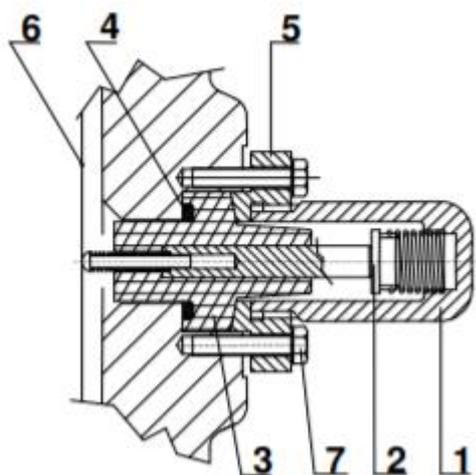


La realizzazione di questo isolatore passante in alta tensione è in accordo alla norma IEC 60137 “Isolatori passanti per tensioni alternate oltre i 1000V “. L’isolatore è classificato da un isolamento in carta impregnata d’olio (OIP) per applicazioni su trasformatori. L’installazione di questi isolatori passanti a condensatore può essere eseguita con un’inclinazione massima di 45° rispetto la posizione verticale e la parte sottoflangia deve necessariamente essere immersa nell’olio del trasformatore. Un nucleo a condensatore identifica l’isolamento elettrico principale, quest’ultimo è realizzato partendo da un foglio continuo di carta Kraft avvolta in un tubo centrale. Durante l’avvolgimento, si inseriscono dei fogli di alluminio che hanno come scopo quello di uniformare, in senso radiale e longitudinale, il campo elettrico tra il conduttore e la flangia. Il lato olio del trasformatore è costituito da una resina epossidica che garantisce una resa nettamente superiore rispetto a materiali ceramici.

Inoltre, la testa del passante costituisce il compensatore d’olio, fondamentale per equilibrare la variazione di volume d’olio con la temperatura.

**Figura 3.9.2. Configurazione isolatore passante lato AT**

La flangia è dotata di: Presa capacitiva, tappo per il prelievo d’olio e presa di tensione. La sua configurazione è quella riportata in figura



- 1- Tappo removibile
- 2- Elettrodo
- 3- Passantino isolato
- 4- Guarnizione
- 5- Flangetta di montaggio
- 6- Armatura
- 7- Viti di fissaggio

**Figura 3.9.3. Configurazione presa capacitiva**

La presa capacitiva permette di effettuare la misura di capacità e  $\tan(\delta)$  da eseguire subito dopo all'installazione sul trasformatore. Durante la misura la presa deve essere sempre messa a terra.

I test da effettuare in questa tipologia di passanti sono indicati dalle norme IEC 60137 che indicano, inoltre, i valori minimi di  $\tan(\delta)$ . La misura si esegue in laboratorio attraverso un ponte di Schering secondo le tensioni e modalità descritte dalle Norme. Nel caso in cui debba essere installato nel trasformatore un passante vecchio, quest'ultimo deve superare una serie di test meccanici ed elettrici. Si esegue, difatti, una prova ermetica e le misurazioni di capacità e fattore di potenza. Gli scostamenti minimi percentuali, indicati dalla Norma, rispetto ai valori nominali riportati nella targa per poter installare un passante vecchio sono:

- 10% per la capacità C1;
- 30% per il  $\tan(\delta)$  della capacità C1;
- 100% per il  $\tan(\delta)$  della capacità C2;

### **3.3.1 Apparecchiatura fornita e installata dall'azienda2.**

La componentistica principale dell'apparecchiatura fornita dall'azienda2 è analoga a quella descritta nel capitolo3.2. Il sistema è composto da elementi per il rilevamento delle caratteristiche principali di un passante, quali: capacità, fattore di dissipazione  $\tan(\delta)$  e leakage current. In aggiunta sono presenti dispositivi per il rilevamento dei gas disciolti nell'olio della macchina (DGA), delle scariche parziali nel passante e negli avvolgimenti della macchina. L'utilizzo di un software offline, fornito dalla stessa casa produttrice, garantisce un'analisi approfondita rispetto alla semplice visualizzazione tramite interfaccia web.

In questo caso in un'unica unità fondamentale vengono raccolte le misure di DGA, scariche parziali (SP) e i parametri caratterizzanti il passante alta tensione. Per la misura della DGA il costruttore garantisce la misura di 9 Gas e di umidità attraverso la tecnica spettroscopia fotoacustica PAS. La misura delle scariche parziali è garantita da un algoritmo di reiezione avanzato che permette un'analisi approfondita dei fenomeni correlati.

Brevemente sono riportate le principali caratteristiche tecniche/comunicative del sistema di controllo online.

**Proprietà ambientali:**

Temperatura operativa	-40 a +55°C
Umidità operativa	5-95% RH , non condensata
Range di temperatura dell'olio	-40 a +120°C

**Potenza:**

Potenza	90-250 VAC, 47-63 Hz, 300W
---------	----------------------------

**Proprietà comunicative:**

Protocolli	ModBus, DNP3 & IEC61850
Carriers	RS232, RS485, Ethernet, 3G, Fibra

**Proprietà tecniche sui passanti:**

Imput channel	2 blocchi sulle tre fasi, acquisizione simultanea di tutti i canali
Imput measuring range	0-200mA
Accuratezza	Ampiezza:0.1% Angolo di fase relativo: 0.05°

**Grado di protezione: IP56**

**3.3.2. Acquisizione dati**

Il metodo di acquisizione dei dati è analogo a quello descritto precedentemente e pertanto è possibile fare riferimento allo schema a blocchi mostrato in figura6. Rispetto al caso precedente è presente un sistema per le misure ad alta frequenza garantendo l'analisi dei fenomeni associati alle scariche parziali.

Lo schema principe del sensore disposto nella presa capacitiva è il seguente:

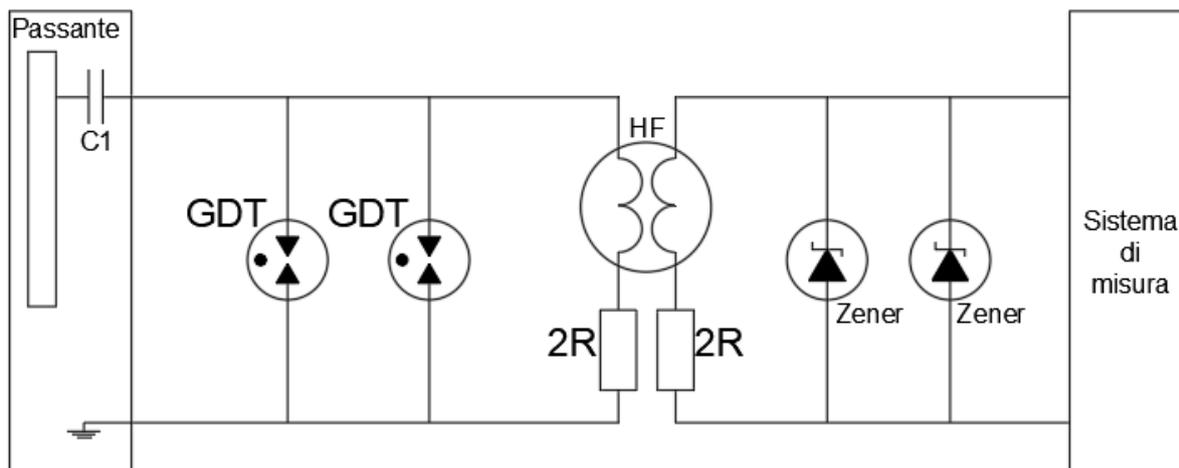


Figura 3.9.4. Schema elettrico sensore azienda2

Dove:

- C1: Capacità equivalente del passante AT;
- GDT: Gas Discharge Tube ( dispositivo di protezione);
- HF: Trasformatore ad alta frequenza per la misura delle scariche parziali;
- Zener: Diodi zener per la protezione de sovratensioni;
- 2R: Resistenza di misura;

Caratteristica fondamentale del sistema di misura è la ridondanza totale. La presenza di due resistenze per la misura consente il funzionamento anche nel caso in cui una delle due vada in cortocircuito o si guasti per qualsiasi altro motivo. La ridondanza è presente anche per i dispositivi di protezione, infatti l'utilizzo di più diodi zener in parallelo ne garantisce la protezione assoluta dei fenomeni di sovratensione. È disposto, all'interno del sensore, un trasformatore in ferrite per la misura delle alte frequenze direttamente sulla presa capacitiva aumentando la precisione dei dati acquisiti. Il collegamento tra il sensore e il dispositivo dell'azienda2 avviene attraverso un cavo Twinax. Il cavo presenta tre conduttori più schermo per limitare i disturbi di modo comune mentre l'armatura del conduttore è collegata a terra.

### 3.3.3. Struttura Software

L'acquisizione e la lettura dei dati acquisiti possono avvenire in due modi:

- Accesso tramite connessione locale;
- Accesso tramite connessione remota;

La prima tipologia di accesso si effettua quando si ha la possibilità di accedere direttamente al dispositivo di diagnostica. Attraverso un semplice cavo di tipo “Micro USB-USB” è possibile collegare il personal computer alla strumentazione. In seguito all’apertura di un browser qualsiasi ci si collega attraverso un indirizzo IP prefissato fornito dalla casa produttrice.

La connessione remota necessita del collegamento alla rete da parte dell’unità di controllo.

Attraverso specifiche credenziali viene garantito l’accesso agli utenti i quali, non possono effettuare alcuna modifica nelle impostazioni ma è consentita solo l’operazione di lettura dei dati.

Il sistema di monitoraggio online si presenta attraverso una videata semplice e intuitiva, caratterizzata da una barra dei menu sempre visibile nella parte superiore dello schermo. Essa permette di selezionare gli elementi base del sistema come la dashboard, le impostazioni, gli allarmi e i dati di esportazione. Nella zona laterale di sinistra è presente un’altra barra che consente la visualizzazione delle varie schermate possibili del sistema come, nel caso specifico, capacità,  $\tan(\delta)$  e scariche parziali.

Di seguito, in figura 3.9.5, è rappresentata una videata generale della home screen del sistema:

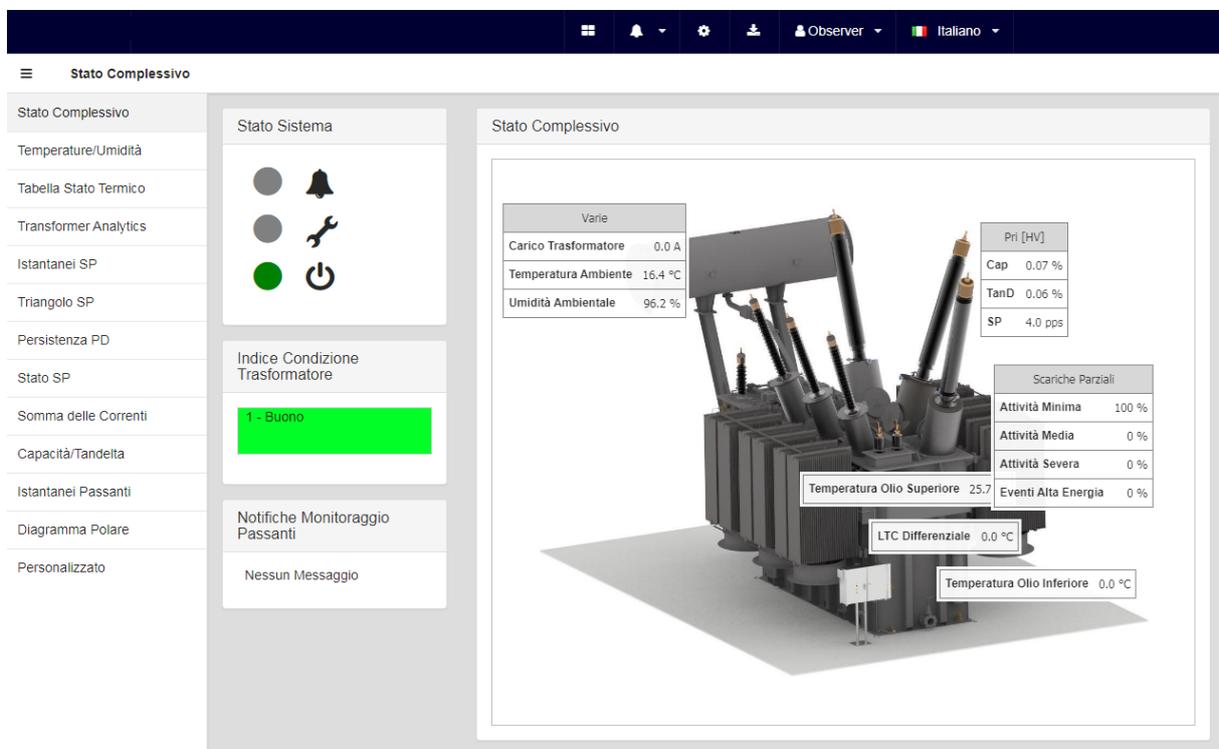


Figura 3.9.5. Schermata principale del sistema di misura online dell'azienda2

Si evidenziano le due barre (superiore e laterale) descritte precedentemente. Grazie all'utilizzo di altri sensori di misura si ha la possibilità di controllare le principali caratteristiche della macchina, quali: Carico del trasformatore, temperatura dell'olio, umidità dell'aria ecc...

Lo stato globale della macchina è mostrato attraverso un indice di condizione del trasformatore. Viene mostrato se l'unità di acquisizione è accesa (LED VERDE), se ci sono allarmi di malfunzionamento (LED ARANCIONE) e se ci sono allarmi di natura pericolosa (LED ROSSO).

Tra le particolarità di questo sistema vi è la possibilità di visualizzare un grafico personalizzato nel quale si possono correlare tutte le misure desiderate. Tutte le grandezze inserite vengono scalate automaticamente sull'asse delle ordinate. Attraverso un'impostazione aggiuntiva è possibile scalare correttamente tutti i grafici con la stessa unità di misura su un singolo asse.

La sezione degli allarmi, raggiungibile dalla barra superiore, indica tutti gli stati e la configurazione degli allarmi. Quest'ultimi possono essere filtrati o visualizzati contemporaneamente. Il sistema di filtraggio consente la visualizzazione degli allarmi in relazione a:

- Stato dell'allarme: se attivo o inattivo;
- Tipologia dell'allarme: La visualizzazione dipende dalla gravosità dell'evento;
- Abilitati dall'utente: La visualizzazione è limitata agli eventi stabiliti dall'utente;

Gli eventi di allarme vengono segnalati in tre modi distinti:

- Indicazione visiva: fornita dai LED installati direttamente sul dispositivo di acquisizione
- Software: Indicazione colorata nella pagina relativa agli allarmi
- Relè di contatto: La disposizione di due relè all'interno dell'apparecchiatura consente la visualizzazione degli allarmi associati agli eventi ad alto rischio. Questi relè possono essere collegati ad altri sistemi di avviso come delle sirene.

Come esplicitato precedentemente, l'azienda<sup>2</sup> fornisce un ulteriore software per l'analisi offline dei dati acquisiti dal sistema di monitoraggio. Per utilizzarlo è necessario esportare i dati dalla versione online del sistema. L'esportazione dei dati può avvenire in qualsiasi finestra temporale che va dalla messa in servizio al momento dell'esportazione. I dati scaricabili rappresentano tutti i punti necessari per la creazione dei grafici associati alle varie grandezze. L'archivio

generato è un file di tipo “.tar” e può essere visionato attraverso un archivio zip ma l’analisi dettagliata è dedicata al software.

Caratterizzante per questo sistema è la discriminazione teorica di una scarica parziale, ovvero la determinazione di dove si verifica la scarica stessa: all’interno del passante o nel cassone del trasformatore. Lo schema rappresentato in figura 3.9.6 indica la configurazione per l’individuazione della scarica.

Il circuito è composto dalla capacità degli avvolgimenti con in serie una capacità associata a un difetto (es: una bolla). Nel circuito di misura vi è un’impedenza in parallelo alla capacità  $C_2$  normalmente di ordini di grandezza superiori rispetto alla  $C_1$ . La scarica parziale che si verifica sulla capacità  $C_1$  si osserva dal circuito diretto; la migrazione degli elettroni verso terra è opposta a quella che si ha quando la scarica avviene all’interno del trasformatore. La polarità dell’impulso è positivo sulla semionda positiva quando l’effetto è sulla capacità  $C_1$  mentre è opposta quando si verifica fuori il passante. La corrente che circola nell’impedenza si determina attraverso una misura in tensione. La corrente misurata non è la leakage current, poiché quest’ultima è una corrente esterna al passante.

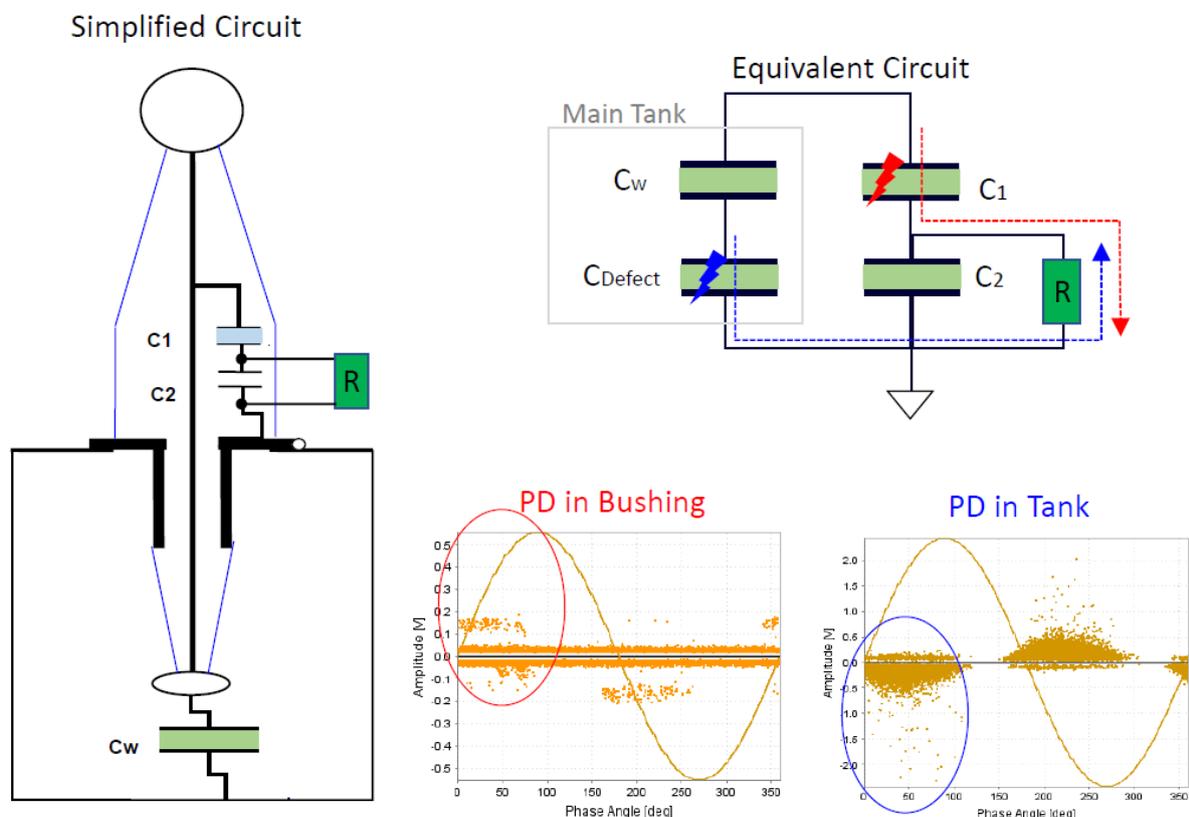


Figura 3.9.6. Schema semplificato di rilevazioni scariche parziali.

In figura, sono evidenziati i due grafici che mostrano gli eventi di scarica parziali concordi e discordi alla semionda positiva garantendo la corretta discriminazione del fenomeno.

L'ottimizzazione del sistema offline di controllo è garantita se vengono rispettati i requisiti di installazione. Caratterizzato da condizioni minime di installazione relativamente basse il sistema trova un campo di applicazione molto vasto.

L'azienda2 fornisce un software installabile localmente su qualsiasi computer rispettando, ovviamente, i requisiti minimi di installazione. In questo modo non è necessaria una connessione internet per analizzare una macchina. Questo software viene utilizzato per incrementare le funzionalità rispetto al software online e gestire i parametri più facilmente. Completata la procedura d'installazione la schermata che si interfaccia con l'utente è la seguente:

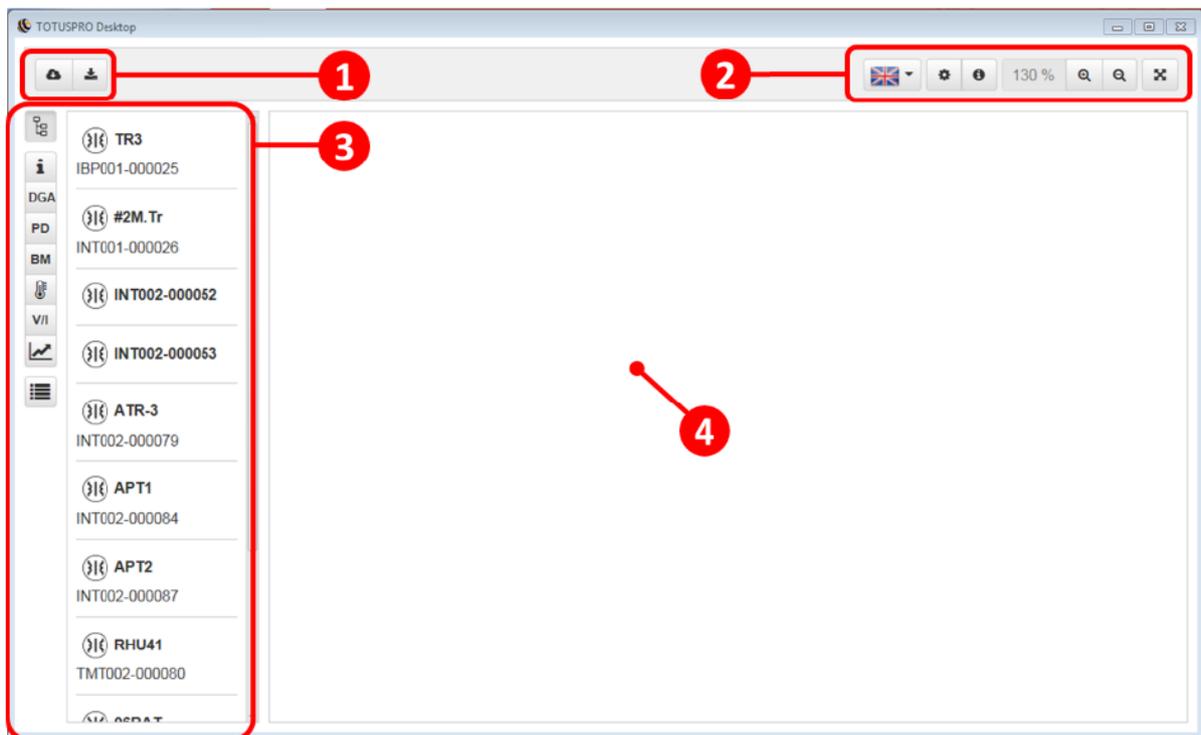


Figura 3.9.7. Schermata home programma offline azienda3.

La schermata si suddivide in quattro regioni:

- 1- Acquisizione dati;
- 2- Impostazioni generali;
- 3- Barra menu laterale;
- 4- Schermata di visualizzazione dati;

Ognuna delle sezioni consente di utilizzare ulteriori funzioni e caratteristiche. L'importazione dei dati è composta da due icone che permettono due diverse modalità di input dei dati. La prima modalità è quella di acquisizione dati tramite una sincronizzazione online con i server associati all'azienda fornitrice. La seconda modalità è quella di inserire i dati in seguito al download di un archivio rar direttamente dalla schermata software online.

La schermata laterale contiene tutte le macchine salvate dal programma, scelta la macchina è possibile accedere ad una videata che mostra tutti i parametri misurati e analizzati dal sistema. Le principali grandezze misurate sono indicate nella seguente tabella:

<b>DGA</b>	<b>PD</b>	<b>Bushing</b>
1. Andamenti DGA	1. Persistenza delle SP	1. Capacità del passante
2. Triangolo di Duval	2. Andamento generale	2. TanDelta
3. Proprietà DGA	3. Triangolo delle SP	3. Diagramma polare
4. Metodo dei gas	4. Ampiezza delle SP	4. Triangolo delle capacità
5. Grafici 3D	5. Pattern delle SP	5. Somma delle correnti
	6. Matrice degli stati	6. Correnti di dispersione
	7. Legenda degli stati	7. Angolo di fase
		8. Proprietà del passante

### **3.4. Azienda3: caratteristiche dei trasformatori e passanti.**

Il sistema di monitoraggio online fornito dall'azienda3 è installato su un trasformatore avente le seguenti caratteristiche nominali:

#### **Trasformatore4**

$S_n = 240\text{KVA}$

$V_{AT} = 230\text{kV}$

$V_{MT} = 15.75\text{kV}$

$I_{ATn} = 602\text{A}$

$f_n: 50\text{Hz}$

$V_{cc\%} = 12.91\%$

Collegamento:

AT: A stella con neutro

Gruppo: 11

BT: A triangolo

Raffreddamento

ONAN

I passanti montati in questa macchina sono i seguenti:

-Passanti BT di tipo GOH;

-Passanti AT di tipo GOEK;

I passanti installati nel trasformatore<sup>4</sup> sono identici a quelli descritti precedentemente per il trasformatore<sup>1</sup>. Per il caso in esame coincidono sia le caratteristiche elettriche che meccaniche.

### **3.4.1. Apparecchiatura fornita e installata.**

L'apparecchiatura fornita dall'azienda<sup>3</sup> consente la misura continua delle condizioni dei passanti dei trasformatori e la rilevazione delle scariche parziali. Come nei casi precedenti, tutte le misurazioni e gli allarmi sono riportati in un sistema di monitoraggio online. L'hardware del sistema è composto principalmente da:

- Processore dei dati acquisiti;
- Sensori;
- Antenna GPS;
- Adattatori;

In particolare, i sensori installati nella macchina sono:

- Tre adattatori per i passanti connessi alla presa capacitiva;
- Fino a quattro sensori del trasformatore di corrente sul neutro del trasformatore;
- Sensori di temperatura e umidità montati sull'apparecchiatura di monitoraggio;

L'installazione dell'apparecchiatura di monitoraggio richiede un'alimentazione in AC di 230V con una corrente di 1A. L'alimentazione deve essere indipendente con la possibilità di essere disconnessa.

Nella figura seguente è mostrato uno schema semplificato dell'installazione dei sensori connessi al sistema di monitoraggio. Si evidenziano i sensori di temperatura dell'olio installati direttamente sul trasformatore mentre i sensori di temperatura ambiente e umidità installati direttamente sul sistema di acquisizione dati. Inoltre, la connessione a terra può essere effettuata francamente o attraverso un'impedenza.

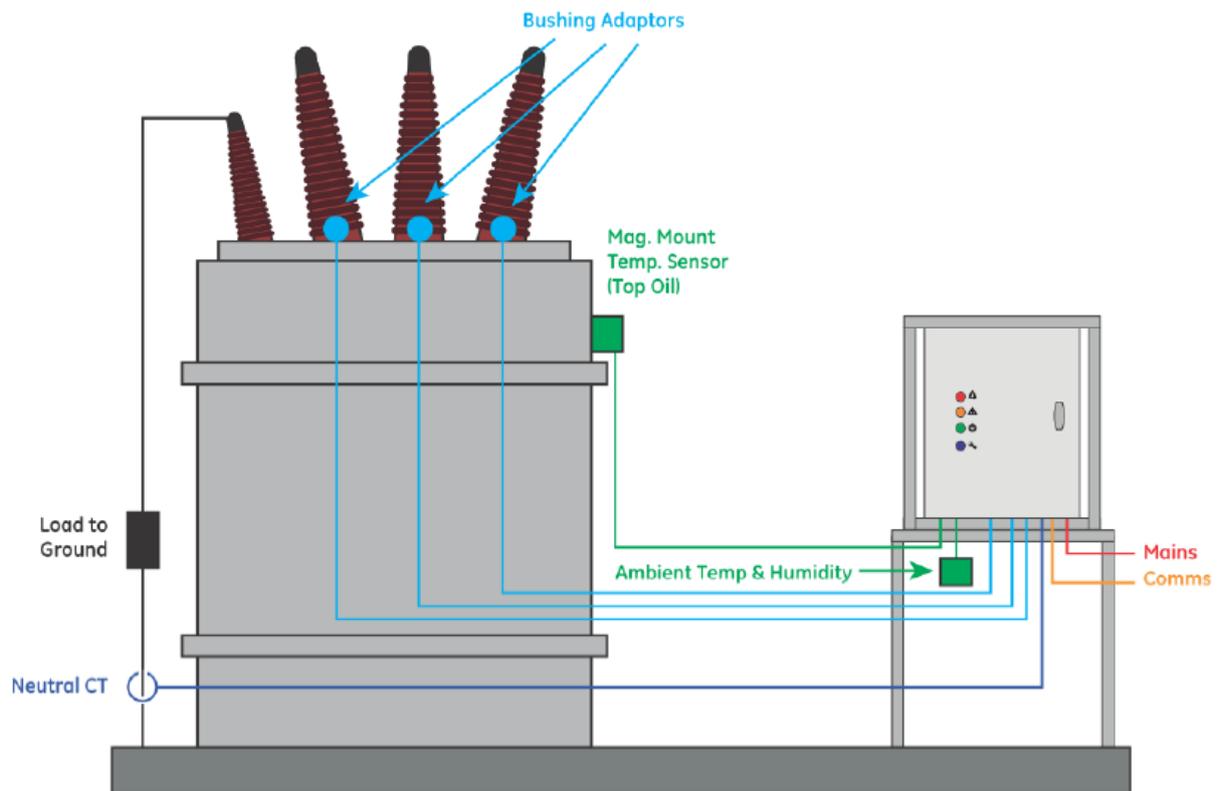


Figura 3.9.8. Schema di montaggio semplificato dei sensori sui passanti.

L'adattatore del passante, rappresentante parte fondamentale del sistema di monitoraggio, viene fornito già assemblato. La configurazione di quest'ultimo è mostrata in figura 3.9.9 e la sua installazione si esegue attraverso i seguenti passaggi :

- Controllo preinstallazione;
- Corpo del sensore avvitato alla filettatura;
- Lasciare il corpo in posizione togliendo il coperchio superiore del sensore;
- Test d'integrità del circuito dell'adattatore;
- Cablaggio

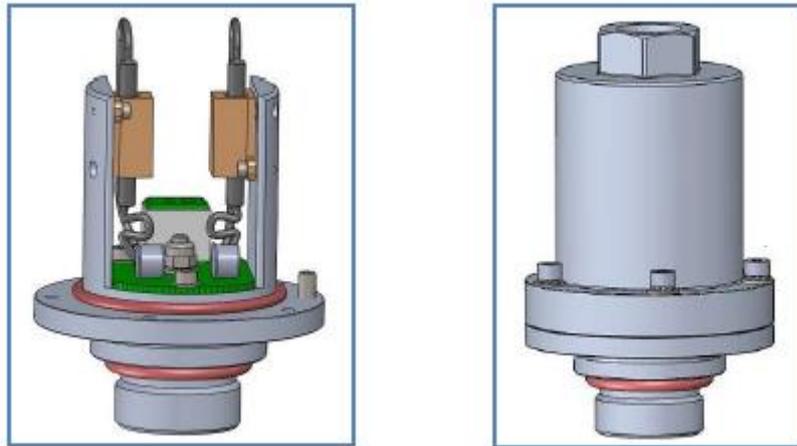


Figura 3.9.9. Struttura standard dell'adattatore.

Gli adattatori vengono forniti con un tappo in plastica filettato. Rimuovendo il test tap originale dal passante è necessario che il sensore si adatti perfettamente al filetto. In caso contrario sarà impossibile procedere con l'installazione. .

### 3.4.2. Acquisizione dati

In figura 3.10.1 è rappresentato lo schema semplificato del sistema di acquisizione online dei parametri descritti precedentemente.

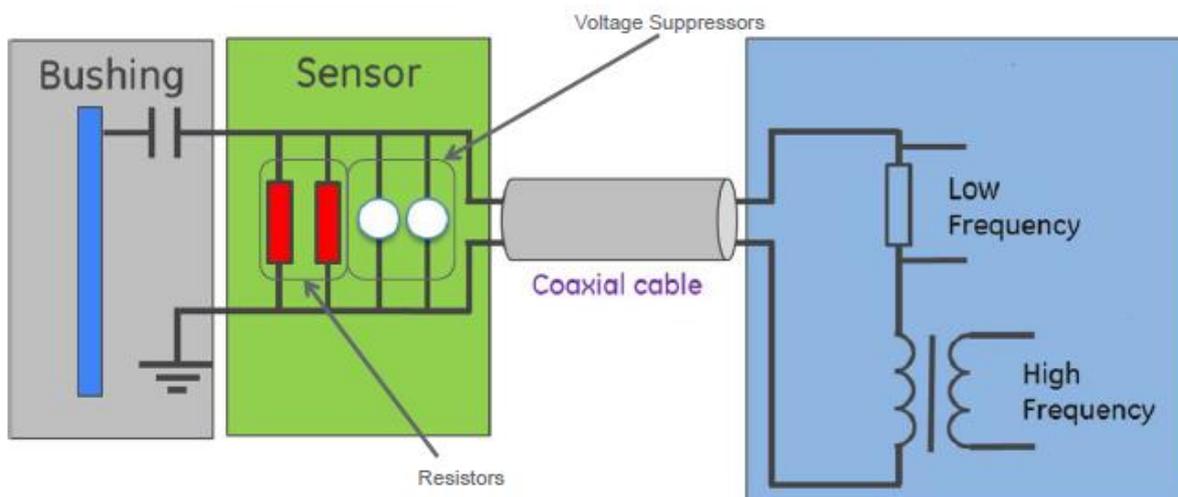


Figura 3.10.1. Schema semplificato del sistema di misura.

La misurazione, come per le altre apparecchiature, avviene tra la capacità  $C_1$  caratterizzante il passante e il riferimento di terra. Un cavo coassiale collegato tra il sensore e la strumentazione garantisce la trasmissione dei dati di potenza e di segnale. Il sensore è composto da due resistenze in parallelo e due limitatori di tensione che ne garantiscono la ridondanza. La misura dei valori di capacità e  $\tan(\delta)$  sono garantiti da una misura a bassa frequenza attraverso una

resistenza mentre le misure dalle scariche parziali si effettuano attraverso un trasformatore amperometrico alle alte frequenze.

La variazione di capacità è fornita dalla misura della leakage current, valutata in modo continuo dall'apparecchiatura, attraverso la seguente relazione:

$$\Delta C_{1\%} = \frac{C_{1rif} \cdot \left[1 - \frac{I_m}{I_{rif}}\right]}{C_{1rif}};$$

Dove:

- $C_{1rif}$ : Capacità  $C_1$  di riferimento (Dato di targa);
- $I_m$ : Corrente misurata;
- $I_{rif}$ : Corrente di riferimento (Dato di targa);

La misura delle scariche parziali all'interno del passante avviene attraverso una misura elettrica che ne quantizza il livello energetico. Si utilizzano trasduttori a ultrasuoni (sensori acustici) e un'antenna con range di frequenza da 300MHz a 1GHz (sensori UHF). Per un segnale ad alta frequenza il sistema determina i seguenti parametri:

- Conteggio SP: N° totale di eventi di scarica parziale per ciclo;
- Valore SP: Ampiezza scariche parziali [pC];
- Indice SP: Potenza media associata a un evento di scarica parziale [mW];

È presente un sensore di neutro. L'installazione di quest'ultimo avviene su una barra o su un cavo con messa a terra. La presenza di un carico comporta l'installazione del sensore tra il carico e il terreno e non tra il passante e il carico.



**Figura 3.10.2. Sensore di neutro**

Prima di eseguire una prova il sensore deve essere rimosso. Per limitare il rumore deve essere installato il più vicino possibile al passante.

Una particolare connessione internet consente la comunicazione tra l'apparecchiatura e il sistema online. L'installazione prevede un MODBUS collegato direttamente alla guida DIN. In alternativa, se viene utilizzato un cavo ethernet in fibra ottica o armata, deve essere collegato a un modulo di comunicazione aggiuntivo. La trasmissione attraverso fibra ottica è consigliata nel caso in cui la sala di controllo si trovi esternamente alla sottostazione.

Il sistema di monitoraggio online ha integrato un chip GPS che viene utilizzato per fornire le indicazioni di data e ora degli eventi misurati. L'antenna GPD in dotazione all'apparecchiatura è dotata di un supporto magnetico per garantirne la posizione verticale verso il cielo. Una chiara porzione dell'antenna deve essere facilmente individuata e posta verso l'alto in modo da ricevere al meglio i segnali GPS. Montata magneticamente necessita di una superficie ferromagnetica adatta. Quest'ultima deve essere collegata al potenziale di terra. In relazione al luogo d'installazione del vano contenente l'apparecchiatura di analisi è possibile installare l'antenna esternamente saldandola nel vano stesso. Il cavo dell'antenna deve essere collegato al punto in alto a destra dell'apparecchiatura come mostrato in figura 9. Sebbene l'antenna non aumenti la probabilità di un fulmine, la superficie stessa non deve far parte di una struttura che potrebbe potenzialmente diventare un parafulmine.

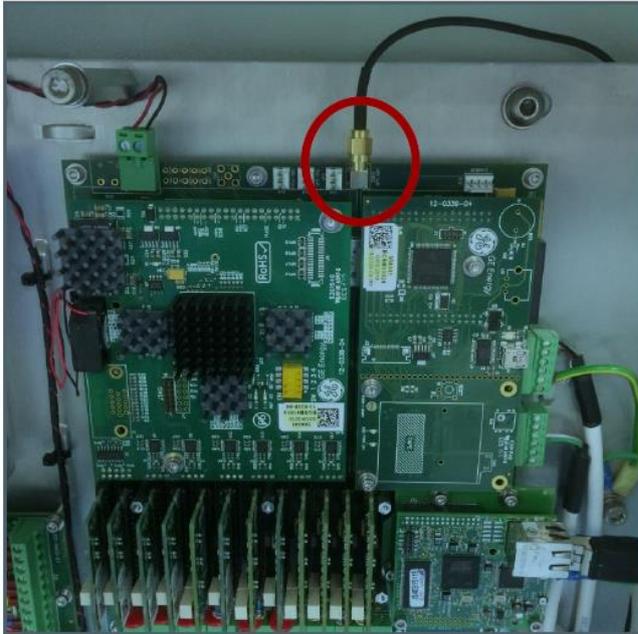
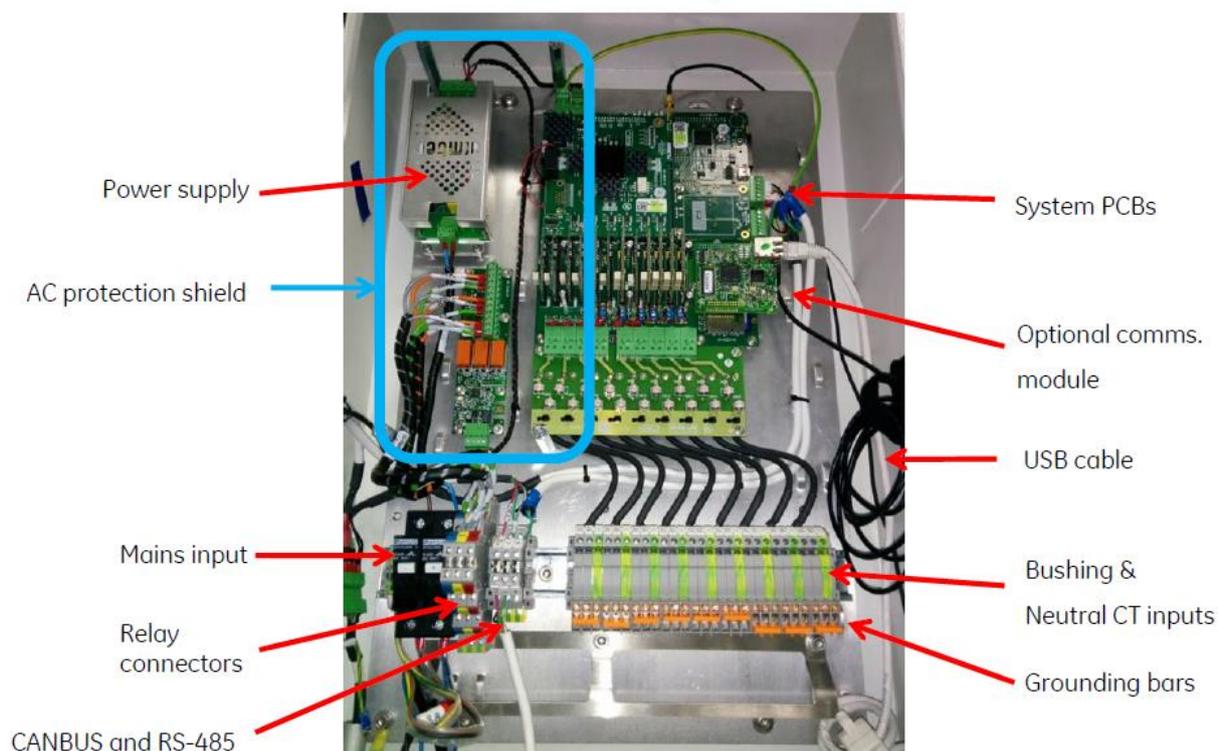


Figura 3.10.3. Collegamento antenna

### 3.4.3. Struttura Software/Hardware.

La prima configurazione che deve essere eseguita è quella di una connessione diretta del software di installazione e l'apparecchiatura di comando. Il collegamento tra un personal computer e il controllo avviene attraverso un cavo USB-micro USB.

Di seguito è rappresentato il layout principale della componentistica dell'apparecchiatura fornita dall'azienda3.



**Figura 3.10.4. Composizione hardware dell'apparecchiatura.**

Per accedere all'armadio del sistema di monitoraggio occorre diseccitare il relè di allarme e applicare le procedure fornite dall'azienda produttrice. La connessione a terra degli ingressi coassiali si effettua attraverso un banco di barre di messa a terra disponibili sui connettori della guida. In seguito alla connessione tra la scheda madre e il personal computer si avvia il setup del software. L'interfaccia di visualizzazione dei dati acquisiti è esclusivamente fornita attraverso il software installato nel PC, non vi è la possibilità di visualizzazione tramite browser online.

Il sistema software è formato da due programmi distinti che, rispettivamente, rivestono il ruolo di:

- Configurazione e comunicazione tra i passanti e il software;
- Analisi e visualizzazione dei dati acquisiti dal sistema online;

La homepage del programma di comunicazione è la seguente:

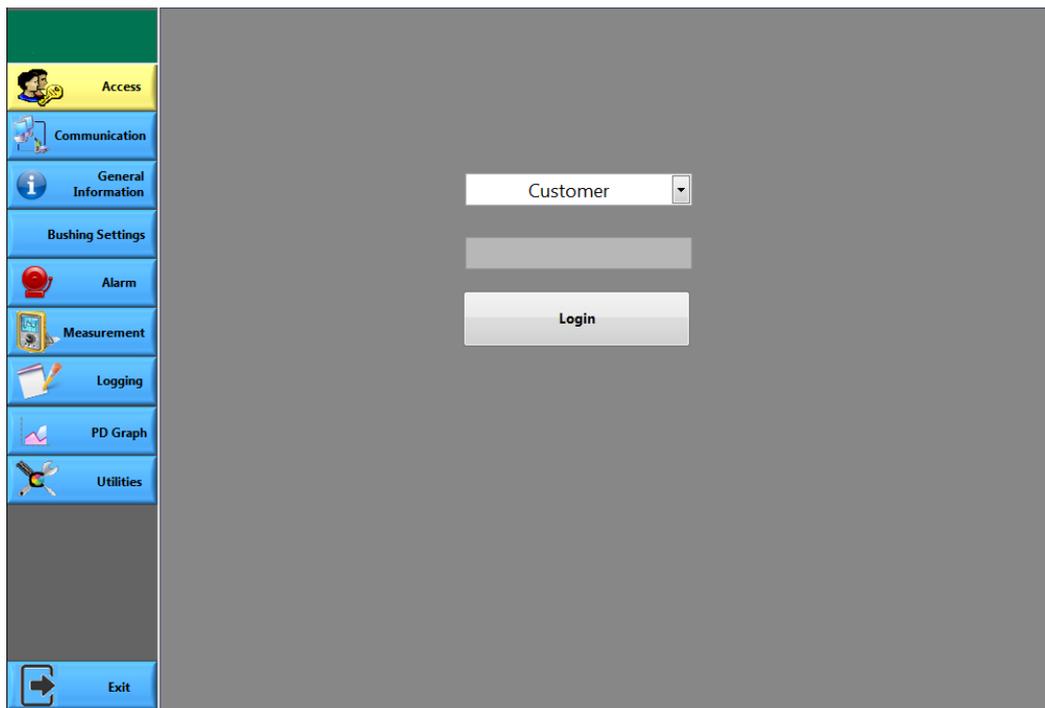


Figura.3.10.5. Homepage programma di monitoraggio fornito dall'azienda3

Il login nella pagina di accesso può essere effettuato da:

- **Customer:** Non viene richiesta alcun tipo di password ed è possibile visualizzare una sezione ben definita del programma.
- **Service:** L'accesso è consentito esclusivamente attraverso una password mensile.
- **Factory:** L'accesso è consentito esclusivamente per uso interno.

L'accesso tramite "Customer" consente, generalmente, la visualizzazione delle caratteristiche principali dei passanti installati, gli allarmi, le misure dei parametri principali della macchina, i grafici sulle scariche parziali e le varie configurazioni di comunicazioni del device.

Un'opportuna sezione laterale consente la visualizzazione delle principali caratteristiche del sistema di monitoraggio. Si ha la possibilità di visualizzare e acquisire i dati principali dei passanti, predisporre i limiti per eventuali allarmi e visionare, attraverso valori istantanei, le principali misurazioni che corrispondono al corretto funzionamento dell'apparecchiatura. È mostrata, in figura3.9.11, un'ulteriore schermata dove vengono identificate le principali impostazioni associate ai passanti. Attraverso il pulsante "Read" vengono automaticamente acquisiti i seguenti valori di riferimento:

- Corrente per fase;
- Angolo di sfasamento per fase;

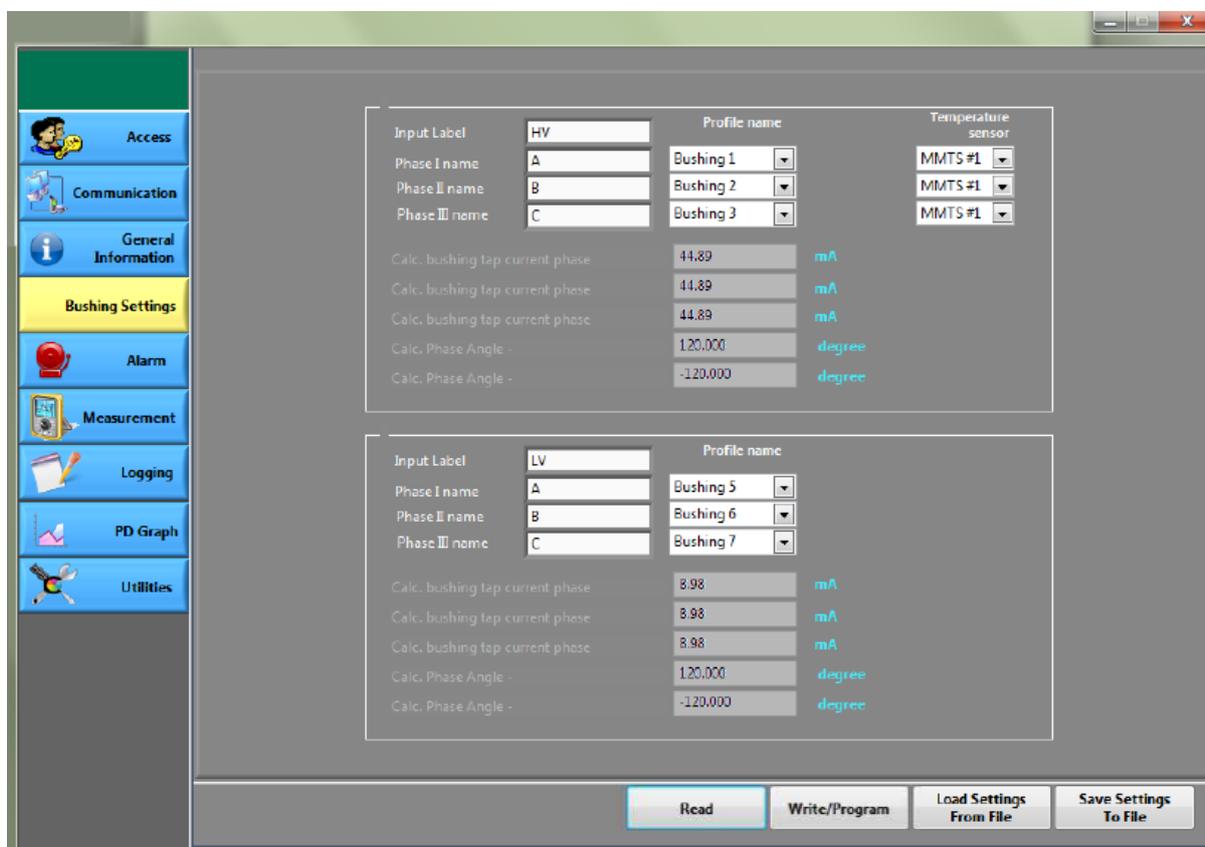


Figura3.10.6. Schermata relativa alle impostazioni dei passanti.

La schermata di misura (fig.3.9.12) si suddivide in due sezioni: “Misurazioni” e “Sensori”. Nella prima sezione vengono mostrati tutti i valori istantanei misurati; parametri del trasformatore e le PD. L’acquisizione dati avviene in maniera continua e costante fintanto non si utilizza il pulsante “STOP”. Attraverso il pulsante “Clean Error” il sistema si resetta all’impostazione precedenti all’ultimo errore verificato.

I parametri vengono acquisiti come segue:

- PF%: La misura del fattore di potenza in % è calcolata sulla base della misurazione dell’angolo di fase confrontandola con il riferimento di fase presente nelle impostazioni di riferimento del passante;
- C1%: La misura della capacità in % è calcolata sulla base della misurazione della corrente nel passante confrontandola con il valore di corrente nominale presente nelle impostazioni del passante;

- PD: Il display mostra il valore massimo di scariche parziali per ciascun ciclo (PD Max), l'ampiezza, il numero di eventi di scariche parziali per ciclo e la potenza media associata a un evento.

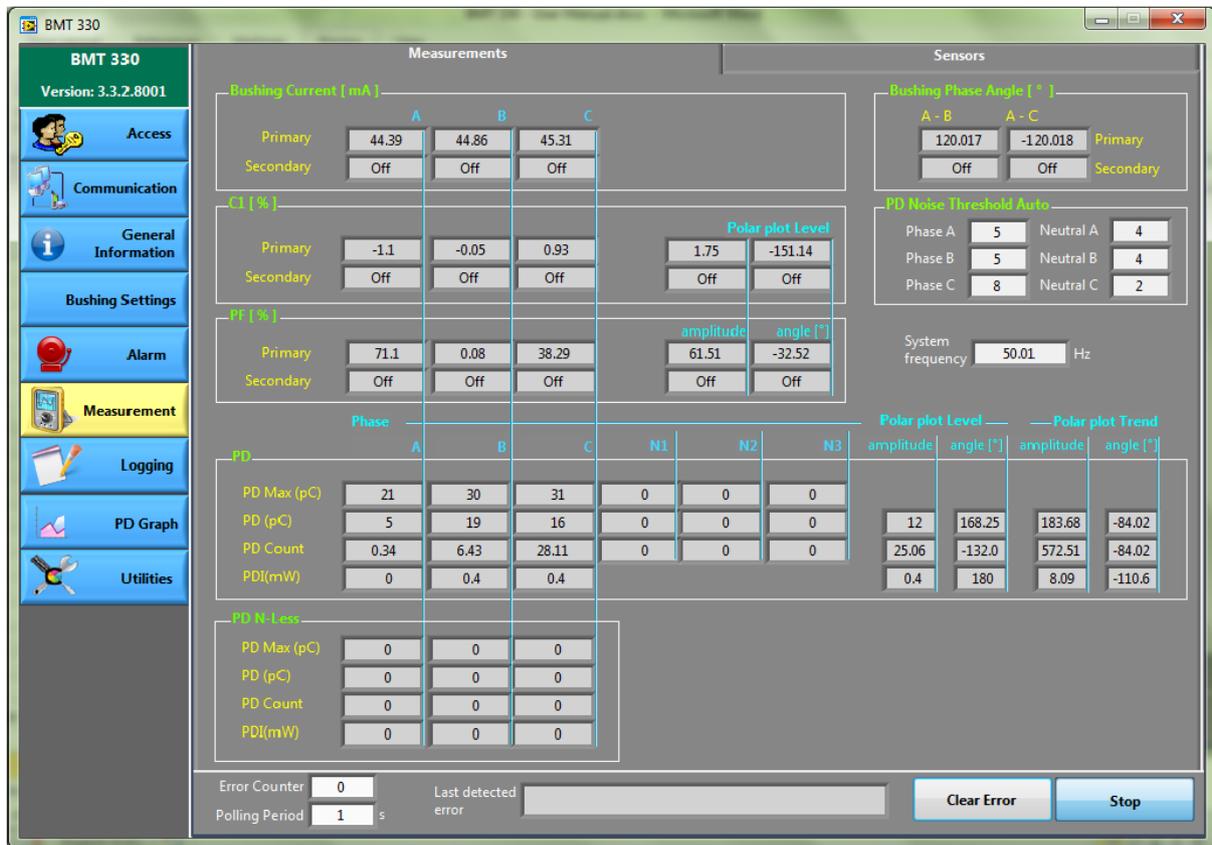


Figura.3.10.7. Schermata Misure.

L'azienda3 fornisce un ulteriore software per l'analisi dettagliata dei parametri della macchina. Quest'ultimo è progettato per facilitare la gestione e la manutenzione delle apparecchiature elettriche per la distribuzione e trasmissione di energia elettrica. Il suo compito è quello di diagnosticare, come i software precedenti, condizioni di errore e misurare i principali parametri delle varie macchine. Il software, per analizzare le condizioni di salute, è implementato attraverso dati di manuali o di campionamento. Il software si collega a un database contenente i dati di campionamento acquisiti dai dispositivi di monitoraggio. Il database può essere archiviato direttamente sul PC, ottenendo una connessione locale o archiviato in una posizione remota attraverso l'uso di un server.

La schermata principale del software, divisa in due sezioni, è mostrata in fig.3.10.8.

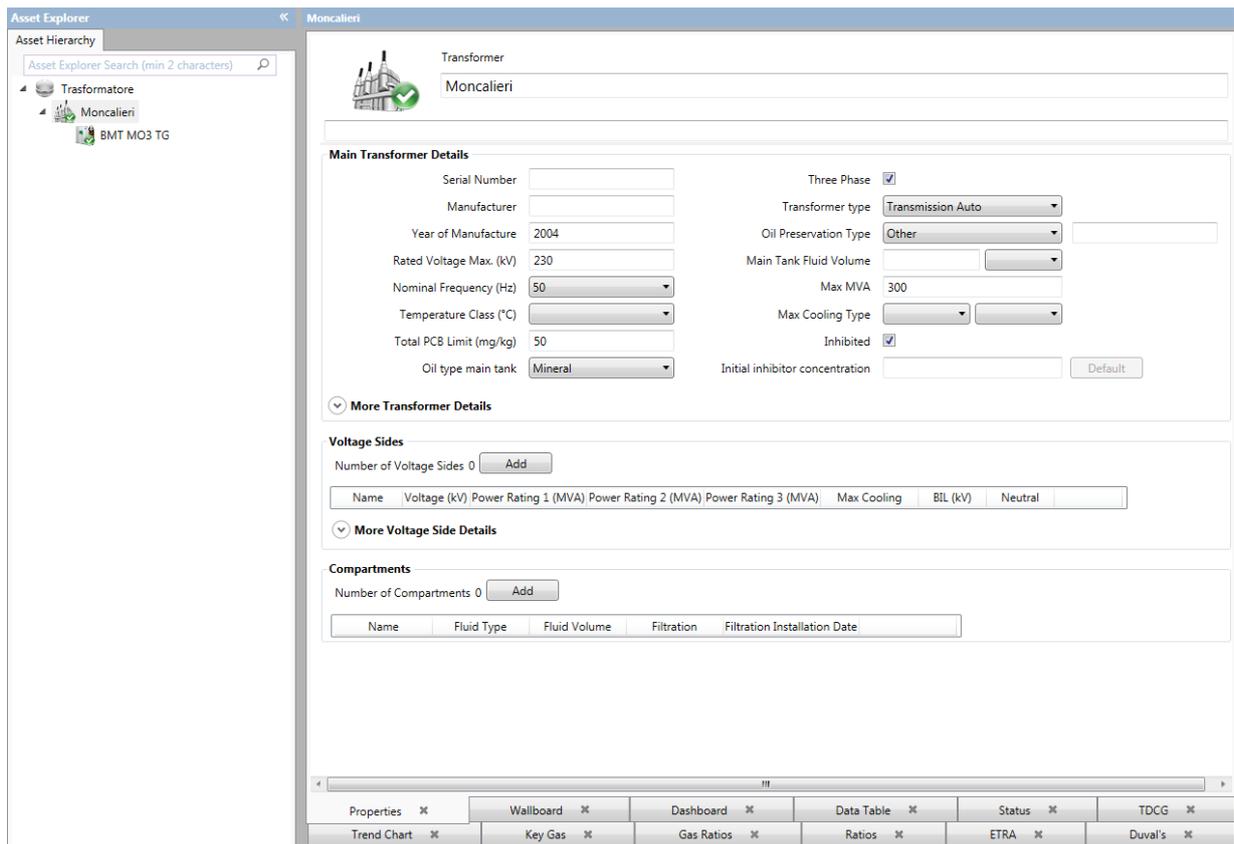


Figura.3.10.8.Schermata principale software azienda3.

La sezione “Asset Explorer” si basa su una struttura ad albero per rappresentare la gerarchia delle configurazioni nel database. Può essere configurato per mostrare la suddivisione tra: sottostazioni, trasformatori e componenti. La struttura ad albero fornisce un mezzo logico per organizzare le varie strutture e un ottimo sistema di navigazione per l’individuazione di errori. Ogni nodo nel ramo rappresenta un sistema, cliccando su quest’ultimo, si espande mostrando la gerarchia e le impostazioni correlate.

La sezione “Data Area” mostra in modo dettagliato i dati acquisiti dal database per ogni nodo selezionato. I valori rilevanti vengono visualizzati attraverso una serie di schede che variano in relazione al nodo selezionato.

Inoltre, attraverso un’opportuna Wallboard disponibile per ogni area preimpostata si visualizza lo stato complessivo di tutte le apparecchiature collegate.

Nel caso in esame, il nodo principale dell’Asset Explorer è costituito da un trasformatore. Espandendo questo nodo è possibile visionare molteplici schermate; le principali sono:

- Transformer Dashboard;
- Devices Summary;

La schermata Dashboard mostra un sommario delle misure e delle informazioni utili al fine di caratterizzare i parametri della macchina. Viene indicato un indice di rischio e i principali valori dei gas disciolti misurati tramite DGA.

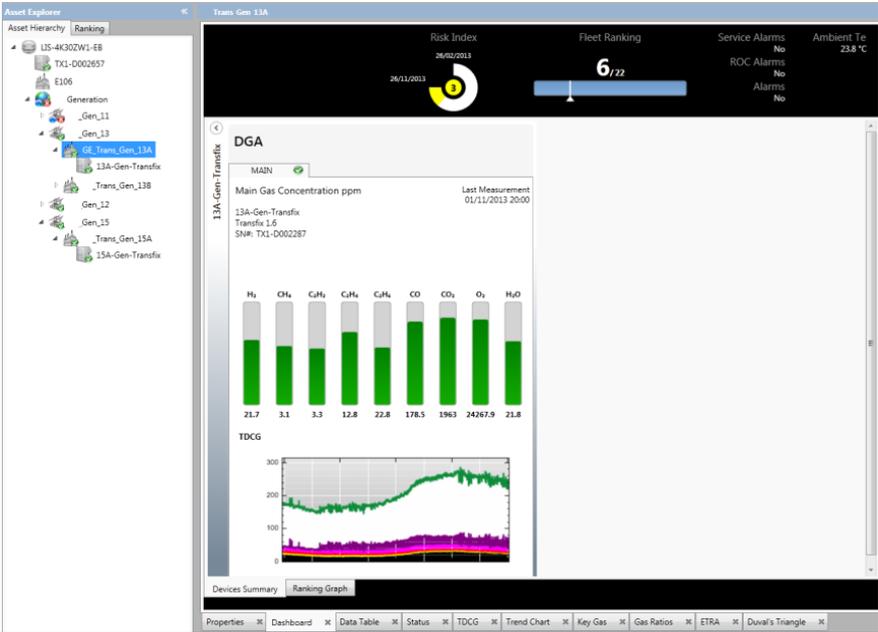


Figura 3.10.9. Dashboard transformer.



Figura 3.10.10 .Device Summary, Primary input.

La schermata Devices Summary consente la visualizzazione delle misure per ogni device in schermate separate. Sono presenti innumerevoli tabelle in funzione degli ingressi forniti al sistema. Nell’esempio seguente sono visualizzate due tabelle contenenti: Input primari e scariche parziali.

La “Ranking page” situata nella sezione di esplorazione classifica automaticamente, secondo un algoritmo, la salute generale delle macchine associate. Gli elementi sono raggruppati secondo un colore il quale, indica lo stato di efficienza. Nel caso in cui non si ha la possibilità di classificare una macchina (es: mancanza di sensori), quest’ultima appare con uno sfondo trasparente.



Figura 3.11.1. Ranking page.

Per revisionare la cronologia dei rischi e delle classifiche per ogni elemento collegato, occorre selezionare la macchina e, attraverso la Dashboard visualizzare il grafico associato.

## **4. Confronto e valutazione**

### **4.1. Introduzione.**

I sistemi proposti per l'analisi dello stato di salute di un passante, nonostante presentino caratteristiche molto simili, si differenziano per alcuni elementi hardware e software che ne comportano vantaggi e svantaggi.

La corretta analisi hardware dei vari sistemi avviene ricercando gli elementi caratteristici che compongono la struttura di acquisizione dati. L'elemento hardware principale è la presa capacitiva. Quest'ultima rappresenta il collegamento tra il passante e il sistema di monitoraggio garantendone l'efficacia, l'efficienza e l'affidabilità.

La presa capacitiva presenta degli elementi comuni per tutti i sistemi quali: resistori per le misure in tensione e sistemi di protezione dalle sovratensioni. Nei paragrafi che seguono sono rappresentate le strutture fisiche delle varie prese capacitive con i rispettivi elementi funzionali.

Nei paragrafi successivi verranno inoltre mostrati le varie tipologie di grafici che caratterizzano i software forniti dalle aziende. Per ogni software utilizzato i grafici relativi alle variazioni di capacità e  $\tan(\delta)$  sono quasi identici tra loro. A livello fisico ognuno di questi si ottiene attraverso medie temporali dei parametri di corrente e angolo di sfasamento ottenuto dai rispettivi sensori. Le piccole differenze software sono quelle che rendono un sistema più affidabile rispetto ad un altro. La possibilità di fornire grafici aggiuntivi per la valutazione complessiva dello stato di salute del passante è sicuramente un punto aggiuntivo per la scelta finale del sistema.

## 4.2 Descrizione grafica e degli elementi caratteristici per azienda

### 4.2.1. Azienda1

Nel caso specifico dell'azienda1, durante l'attività di tirocinio, è stato svolto il processo di installazione e verifica dell'apparecchiatura in loco. Pertanto, alcune immagini che seguiranno sono delle foto scattate durante l'attività indicata precedentemente. In primis, nella figura che segue è indicato un modello molto semplificato della presa capacitiva dove: Le estremità in grigio rappresentano gli opportuni sistemi di serraggio diversi in relazione alla tipologia nel passante. L'estremo inferiore, collegato al test tap, non può essere standardizzato poiché è fortemente dipendente dalla tipologia costruttiva del passante. Le parti colorate interne al sensore indicano i dispositivi elettrici ed elettronici, descritti in [figura3.7](#), necessari per la corretta misurazione dei parametri e per la protezione dell'intero sistema.

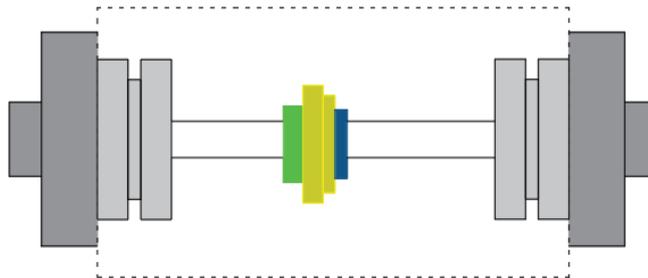


Figura 4.0. Modello semplificato sensore del passante



Figura 4.1. Configurazione apparecchiatura



Figura 4.2. Presa capacitiva installata in una fase

La struttura in figura 4.1 mostra esattamente l'apparecchiatura descritta nel paragrafo 3.2.2. La fase di montaggio è stata precedentemente svolta da personale autorizzato; ci si è occupato delle verifiche dei cablaggi dagli shorting-block all'unità elettronica di controllo. Il cablaggio dai BTA agli shorting-block sono stati effettuati con opportuni cavi schermati forniti dall'azienda stessa. Necessarie sono le verifiche dell'alimentazione a 24Vdc e delle uscite di comunicazione al modem installato. Si procede, manualmente, all'aggiornamento del firmware all'ultima versione disponibile e si configurano tutte le sezioni del software. In particolare, sono stati definiti i dati generali del sistema e quelli relativi ai passanti ( i valori di capacità e  $\tan()$  sono quelli di collaudo del costruttore del trasformatore). Infine, è stato configurato il modem per permettere l'accesso da remoto al sistema.

In figura 4.2 è mostrata una delle prese capacitive installate in una delle fasi del trasformatore. È stata eseguita la verifica dell'acquisizione dei segnali dalle prese capacitive. Quest'ultima ha dato esito positivo con la verifica aggiuntiva dei valori di corrente misurata alle prese capacitive.

Attraverso il software di acquisizione dati si ricavo i seguenti andamenti di capacità e  $\tan(\delta)$  per passante.



Figura 4.3. Andamenti Power factor Tap1 e Tap2

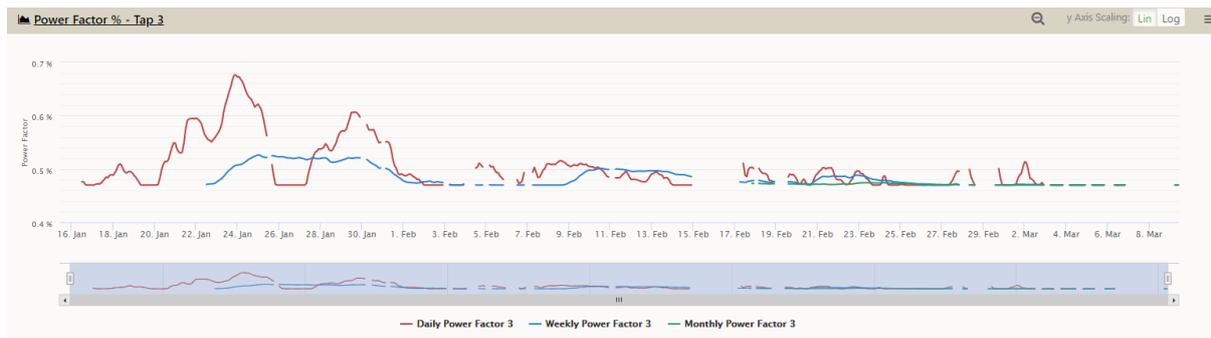


Figura 4.4. Andamento Power factor tap 3

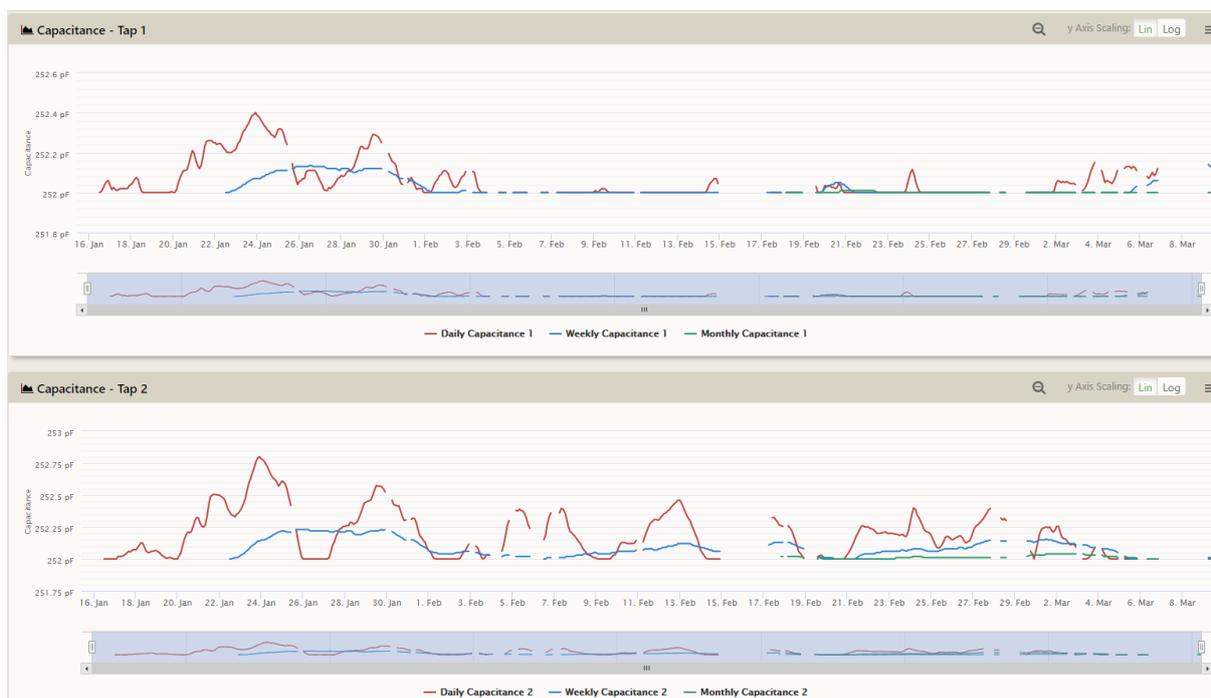


Figura 4.5. Andamento capacità Tap 1 e Tap 2

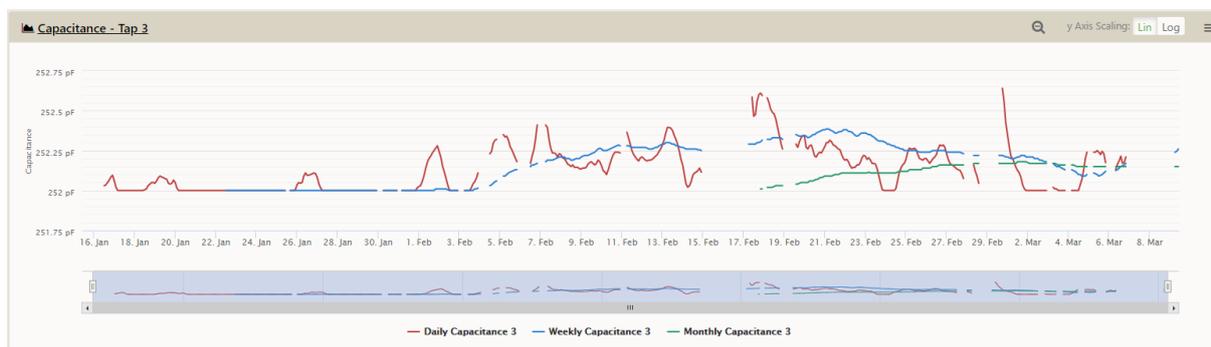


Figura 4.6. Andamento capacità Tap3.

I grafici ottenuti dal software di analisi permettono un confronto semplice e immediato con i valori acquisiti durante l'intervallo di tempo di: un giorno, una settimana e un mese. La possibilità di confrontare questi andamenti in un unico grafico consente una facile individuazione di un

possibile guasto all'interno dell'isolatore. L'analisi effettuata durante l'attività ha portato ad un esito positivo per quanto riguarda lo stato di salute dei passanti in esame. Si vuole evidenziare, infatti, che gli andamenti si discostano dal loro valore nominale di appena:

- 0.2% per il  $\tan(\delta)$ ;
- 0.75pF per le capacità;

Questi valori sono le variazioni massime registrate durante tutta l'attività. Nei grafici sono presenti dei tratti vuoti dovuti a semplici periodi di manutenzione del trasformatore e quindi periodi di off dello stesso. La vera e propria analisi comparativa dei valori acquisiti si effettua esportando i dati dal software e aggiungendoli a un foglio di calcolo quali: Excel. Ottenuti tutti i valori delle grandezze elettriche associate ai passanti si è effettuato un controllo e un confronto con i parametri di riferimento e quelli calcolati. Essendo migliaia i valori registrati si ritiene opportuno riportare in figura soltanto alcuni valori. Dallo stesso foglio di calcolo si evidenziano i valori di riferimento per fase i quali sono confrontanti con tutte le misurazioni ottenute.



#### 4.2.2. Azienda2

L'azienda2 fornisce una presa capacitiva avente la seguente configurazione:

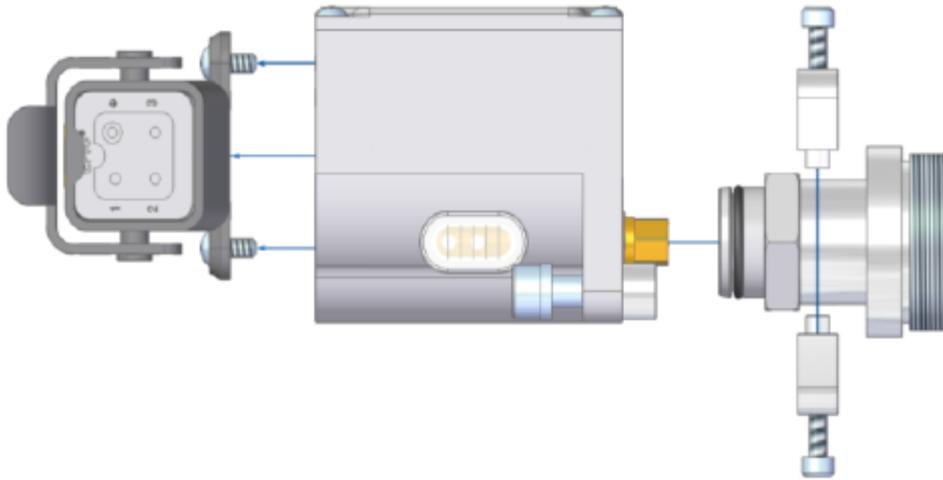


Figura 4.8. Configurazione principale presa capacitiva azienda2

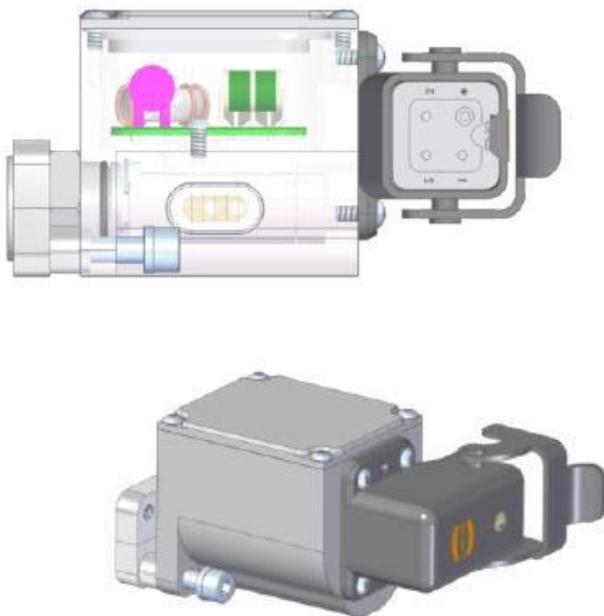


Figura 4.9. Visualizzazione interna ed esterna della presa capacitiva non esplosa

Il connettore della azienda2 è formato da tre parti principali: L'adattatore, il corpo e la testa. Il corpo certificato come IP67 contiene al suo interno gli elementi elettronici, meccanici e di protezione. In questo caso particolare è presente una finestra che mostra la corretta connessione con il PIN del passante. Non essendoci alcuna filettatura tra il corpo e la testa, si collega quest'ultima direttamente al PIN e può rimanere inserita durante le misure offline. Il sensore è composto da due resistenze in parallelo per limitare il segnale al volt. Inoltre, sono presenti una serie di dispositivi di protezione per le sovratensioni. Caratteristica principale che distingue

questa presa dalle altre è la presenza di un trasformatore amperometrico ad alta frequenza per la misura delle scariche parziali garantendo la minima attenuazione del segnale. Il principio di montaggio della presa è semplice: a mano si inserisce della pasta conduttiva nel filetto e, successivamente si stringe la testa con una chiave esagonale dinamometrica. Infine, il corpo collegato alla testa è serrato attraverso due viti.

In figura 3.9.4 del paragrafo 3.2.2 è presente lo schema elettrico equivalente della presa capacitiva.

Nel mondo odierno i dispositivi elettronici rivestono un ruolo sempre più importante. Risulta necessario descrivere gli elementi che garantiscono la protezione del sistema di misura dalle sovratensioni. Oltre a proteggere i circuiti possono essere utilizzati come interruttori per creare una tensione di scarica negli stessi. Nella pratica si distinguono due classi di dispositivi per la protezione contro le sovratensioni:

- Crowbar: dispositivi come GDT(Gas Discharge Tube) e SCR
- CLAMP: dispositivi come diodi zener e MOV

Nella presa capacitiva fornita sono presenti un GDT e un MOV;

IL GDT consiste in un involucro ceramico ermeticamente sigillato contenente un tubo con elettrodi metallici, si caratterizza per: parametri elettrici stabili, basse capacità, alti livelli di corrente, bassa corrente di dispersione e arco elettrico limitato. Di seguito se ne descrive brevemente il funzionamento:

Affinché inizi la conduzione un elettrone all'interno del dispositivo deve ottenere energia sufficiente per la ionizzazione del gas. La ionizzazione completa avviene in seguito alla collisione degli elettroni. Un guasto che causa la ionizzazione del gas comporta una variazione dell'impedenza da un valore elevato a uno paragonabile a un corto circuito virtuale, pertanto qualsiasi transitorio verrà deviato e non raggiungerà il circuito protetto. In seguito al transitorio il GDT passerà nello stato di OFF e si comporterà come un circuito aperto, per questo passaggio di stato la corrente che lo attraversa deve essere inferiore alla sua corrente nominale. La caratteristica tensione/corrente generica di un GDT è la seguente:

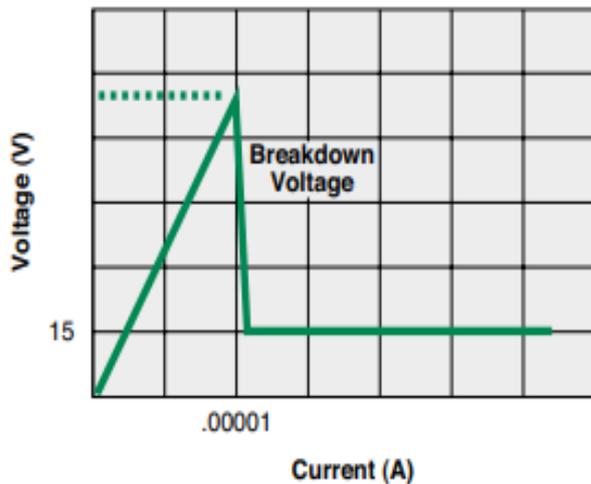


Figura 4.1.0. Caratteristica tensione/corrente di un GDT

La tensione di rottura è direttamente proporzionale a: tipo di elettrodo, dal tipo di gas (usualmente neon o argon), pressione del gas. Il numero di volte in cui si verifica il transitorio influenza notevolmente la caratteristica di breakdown del GDT. La tensione di rottura è definita come quel valore di tensione che fa variare lo stato di alta impedenza a quello di bassa.

Il MOV dall'acronimo inglese "Metal Oxide Varistor" è un resistore variabile di tensione realizzato tramite ossidi di metallo. Si può pensare che i grani prodotti dall'ossidazione del metallo si comportino come una rete di diodi in serie e in parallelo. Quando la tensione fa crescere il potenziale del MOV alcuni dei diodi iniziano a condurre diminuendo la resistenza netta del dispositivo. Rispetto al diodo può gestire impulsi di corrente con valori di picco più elevati e per una durata maggiore. Quando i valori diventano troppo alti i grani di ossido tendono a fondere modificando la prestazione del MOV. La caratteristica tensione/corrente del MOV è rappresentata in figura20.

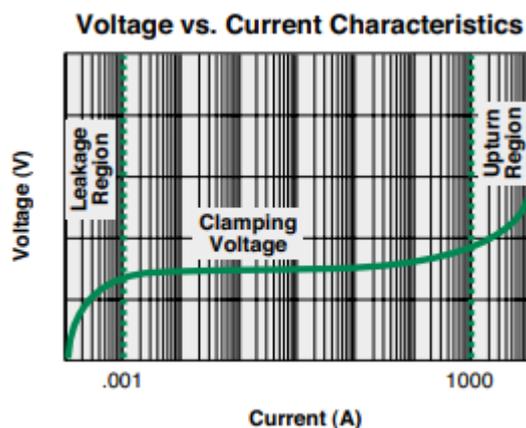


Figura 4.1.1. Caratteristica tensione/corrente di un MOV.

Si evidenzia che per un determinato range di corrente la tensione ai capi si mantiene costante. Per valori minimi e massimi di corrente la tensione assume un andamento esponenziale che ne caratterizza i valori nominali.

In sintesi, non esiste un dispositivo di protezione dalle sovratensioni ideale capace di soddisfare tutti i parametri di ogni applicazione. Per le loro caratteristiche di prestazioni, tuttavia, un GDT e un MOV possono essere combinati in un circuito per fornire il massimo in termini di prestazioni di soppressione delle sovratensioni. Il MOV blocca rapidamente un brusco aumento

della tensione mentre il GDT permette di dissipare in sicurezza la grande corrente di picco verso terra.

Dal circuito elettrico del sensore capacitivo si evidenzia la ridondanza di ogni dispositivo; garantendo la protezione assoluta del sistema di acquisizione dati.

L'intervento del sistema di allarme si può verificare anche immediatamente dopo l'installazione della presa. I valori nominali del passante, in particolare la capacità C1, sono il punto di partenza per il dimensionamento dei dispositivi di misura della presa capacitiva. Avviato il sistema di acquisizione dati, successivamente all'installazione, se il valore di capacità non corrisponde a quello preimpostato intervengono i dispositivi di protezione isolando l'apparecchiatura. Un valore errato della capacità C1 causa un errore sulla configurazione del sistema stesso.

La corretta alimentazione e acquisizione dei dati è assicurata dal conduttore interposto tra il sensore sulla presa capacitiva e il processore. In questo caso vengono utilizzati cavi armati e calpestabili senza bisogno dell'utilizzo di canali o tubazioni. Il cavo non è coassiale ma presenta tre conduttori più schermo per limitare al minimo i disturbi di modo comune poiché la misurazione è di tipo differenziale. Tra i vantaggi hardware forniti dall'azienda<sup>2</sup> vi è la possibilità di effettuare una misurazione online senza escludere completamente l'adattatore. Escludendo il corpo dalla presa capacitiva si inserisce un adattatore verso l'esterno in PVC che crea un'estensione del pin centrale permettendo la misura. L'adattatore è in PVC poiché uno in plastica risulterebbe altamente non performante; con l'irradiazione solare la plastica si deteriora e consente l'accesso di umidità.

Il sistema di misura deve essere correttamente connesso a terra; l'armatura e lo schermo del conduttore sono connessi verso terra separatamente per evitare perdite di modo comune.

Per effettuare un'analisi di come il sistema hardware e software acquisiscono e analizzano i dati è necessario descrivere nel dettaglio i grafici ottenuti dal monitoraggio online. Verranno evidenziati gli andamenti relativi alla capacità e al  $\tan(\delta)$  associati a ciascun passante in periodi di analisi differenti.

Come descritto precedentemente il sistema si basa sull'implementazione matematica di medie giornaliere, settimanali e mensili. Alla base dell'algoritmo di elaborazione vi è una fase di acquisizione dati che prende il nome di "learning period"; in questo intervallo vengono registrati i dati in modo da verificare i valori di riferimento nominali e impostare i valori base per le elaborazioni future. Il learning period termina con l'azzeramento dei valori relativi delle

capacità e del  $\tan(\delta)$ ; nel caso in esame, per l'apparecchiatura fornita dall'azienda2, questo periodo termina in data 26/04/19.

Di seguito sono rappresentati due grafici tipici di andamenti giornalieri e mensili delle capacità e  $\tan(\delta)$ .

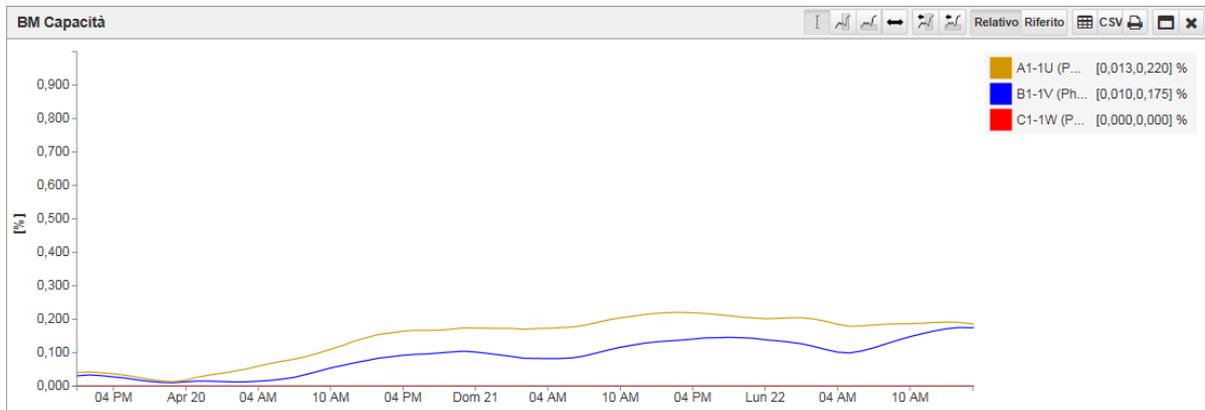


Figura 4.1.2. Andamento capacità trasformatore1 azienda2 nel periodo di analisi dal 20/04/19 al 21/04/19.

Si vuole evidenziare come nell'arco di analisi di 24 ore, le capacità presentano degli scostamenti dal valore di riferimento praticamente nulli. La dinamica di variazione dovuta a fenomeni di deterioramento o elettrici è molta lenta e, pertanto invisibile in periodi di acquisizione così brevi.

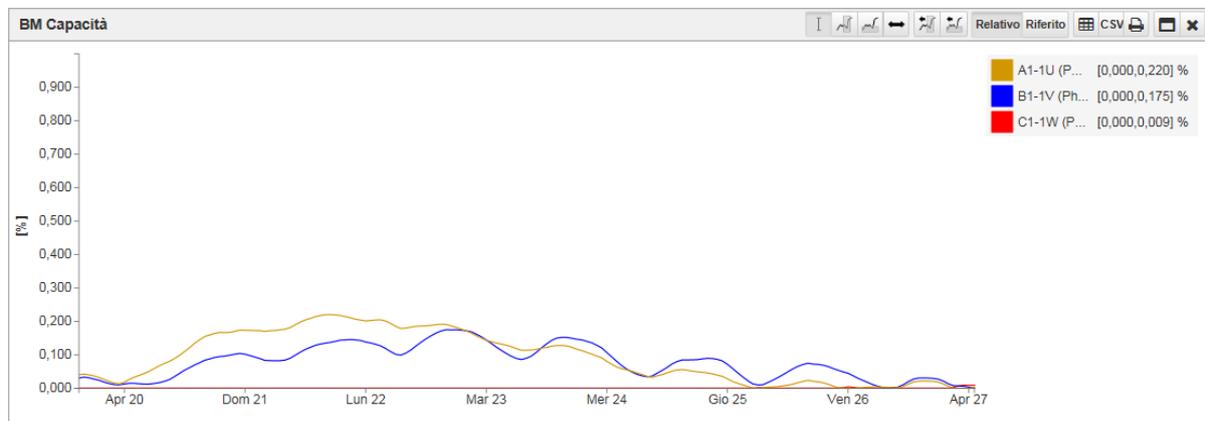
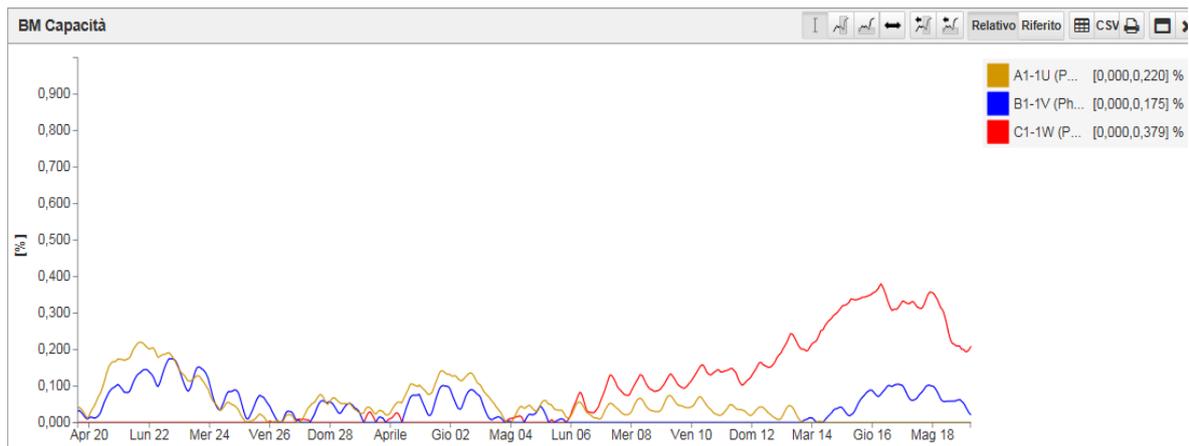
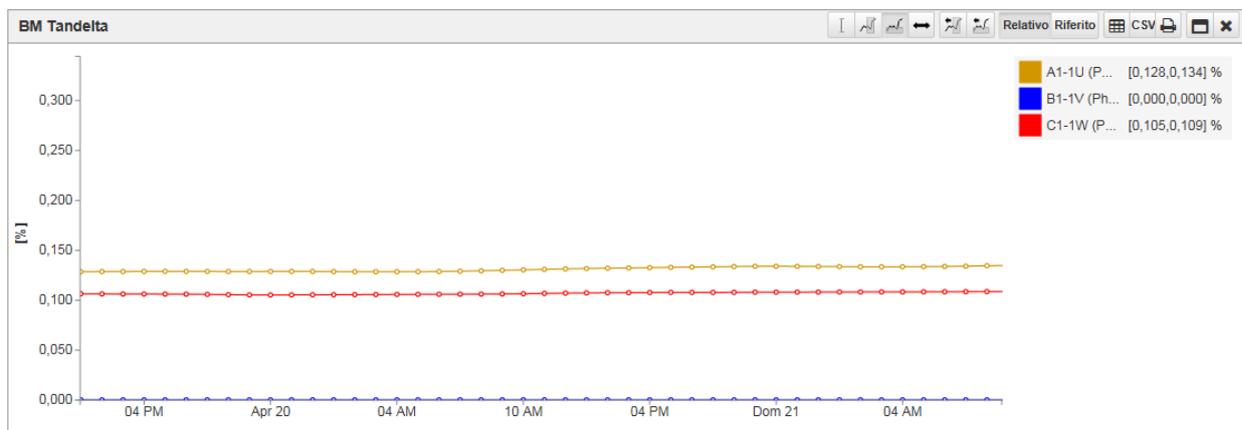


Figura 4.1.3. Andamento capacità trasformatore1 azienda2 nel periodo di analisi dal 20/04/19 al 27/04/19



**Figura 4.1.4. Andamento capacità trasformatore1 azienda2 nel periodo di analisi dal 20/04/19 al 20/05/19**

L'ultimo grafico mostra l'andamento delle capacità nel periodo di analisi di un mese. In questo arco di tempo è possibile vedere bene se le capacità associate al passante riscontrano problemi dal punto di vista fisico. Un deterioramento o comunque un corto circuito dei layer del capacitore comportano un incremento sempre crescente rispetto al proprio valore di riferimento. L'analisi grafica di questi andamenti indica che il passante è in buona salute dal punto di vista delle capacità



**Figura 4.1.5. Andamento del tan(δ) trasformatore1 azienda2 dal 20/04/09 al 21/04/19.**

Le variazioni di  $\tan(\delta)$  nonostante presentino una dinamica molto veloce rispetto alle capacità non si vedono nelle analisi temporali di breve durata. Come si vede dalla figura nell'arco di 24 ore le variazioni di  $\tan(\delta)$  sono praticamente nulle.

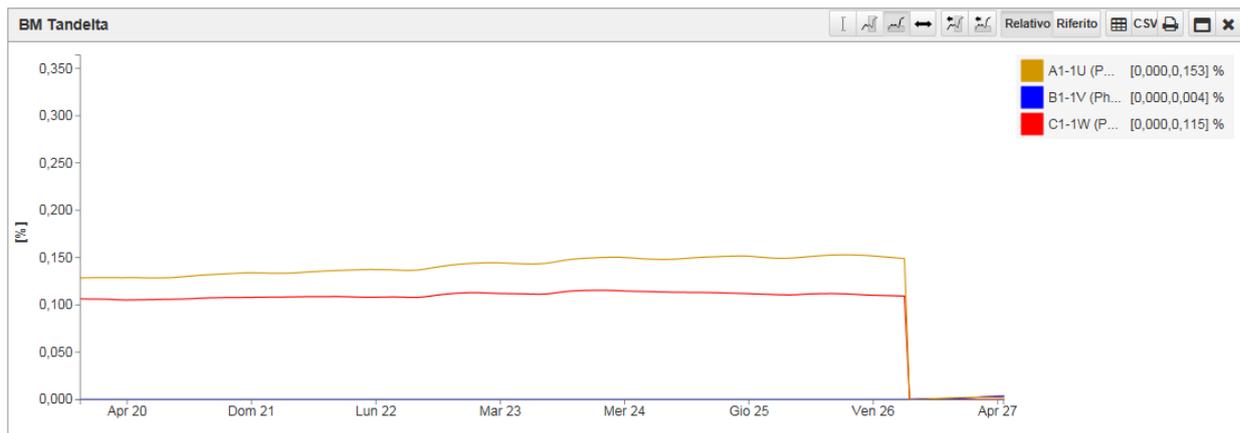


Figura 4.1.6 Andamento del tan(δ) trasformatore1 azienda2 dal 20/04/19 al 26/04/19.

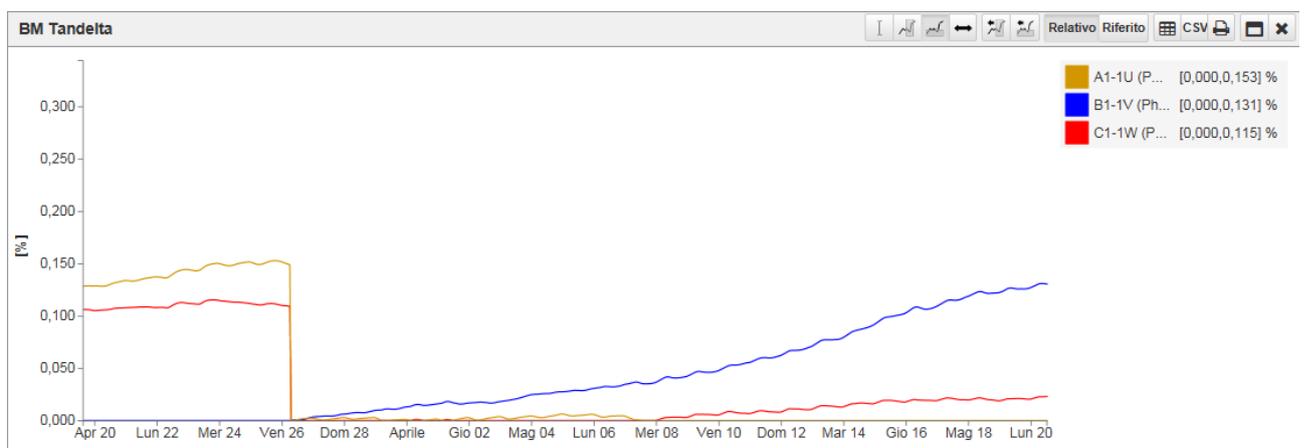


Figura 4.1.7. Andamento del tan(δ) trasformatore 1 azienda2 nel periodo di analisi dal 20/04/19 al 20/05/19

Il grafico in figura è molto importante per l'analisi svolta. Si nota immediatamente l'incremento nel tempo del fattore  $\tan(\delta)$  associato alla fase B. Un incremento del genere porta subito a pensare ad un possibile guasto nel passante. Quest'ultima affermazione è completamente sbagliata. Da un'osservazione più accurata si vuole mettere in evidenza come l'andamento crescente associato alla fase B in realtà si discosta dal suo valore nominale di appena lo 0.5%. Un incremento così basso non può essere associato, come prima considerazione, ad un guasto. Nel caso in esame è stato contattato il tecnico competente del trasformatore e in seguito si è confermata la buona salute del passante.

I grafici mostrano gli andamenti relativi delle grandezze descritte precedentemente. Nella realtà di calcolo il software sceglie come riferimento la misura di capacità e  $\tan(\delta)$  che più si avvicina al riferimento nominale piazzandola allo 0% relativo; questo valore diventa il nuovo riferimento per i suoi corrispettivi nelle altre due fasi. L'utilizzo di medie giornaliere non fornisce una misura veritiera sullo stato di degradazione del passante; i piccoli scostamenti relativi non sono causati da problematiche nel passante ma, principalmente, da fenomeni ambientali e di

fluttuazioni del carico. Differenza sostanziale tra i due parametri è la costante di tempo che li caratterizza, difatti nonostante un'acquisizione giornaliera permetta di vedere dei piccoli scostamenti nelle capacità non consente di osservare alcuna variazione nel  $\tan(\delta)$ .

È necessario sapere come distinguere un guasto sulla capacità e sul  $\tan(\delta)$  osservando i grafici. Generalmente, i passanti sono formati da un numero determinato di layer (70-80) se, due armature vanno in corto circuito tra loro la capacità del sistema varierà. Nel caso specifico di due capacità questa variazione corrisponde a circa l'1% della capacità del sistema. Il numero di layer influisce molto sulla scala di riferimento del sistema poiché, se il sistema presentasse 10 layer il corto circuito tra due armature comporterebbe un incremento del 5% della capacità. Ricordando difatti che:

$$C_{eq} = \frac{1}{\sum_1^n \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \right)};$$

Le variazioni di capacità dovute a un corto circuito dei layer si notano bene negli andamenti settimanali e giornalieri (se particolarmente gravosi). Mentre le variazioni dovute all'alterazione dei parametri fisici che le caratterizzano si esprimono, graficamente, come un incremento inarrestabile rispetto al suo valore di riferimento. Un andamento variabile e oscillatorio, come in figura 4.1.4, non può essere indice dello stato di degradazione fisico di un passante ma rappresenta un'oscillazione del carico o al massimo la presenza di umidità o di una sovratemperatura. Risulta utile il confronto con un caso pratico dove l'incremento repentino di una capacità ha permesso di effettuare il disservizio della macchina in tempi utili. Come si vede dalla figura 4.1.8, successivamente alla fase di learning period, gli andamenti delle capacità per fase sono oscillatori e variabili nel range compreso lo 0% e il 0.5%. In tempi brevi i valori della capacità hanno raggiunto valori relativi pari al 3% del valore di riferimento. Nel caso specifico in seguito al disservizio della macchina si è eseguita la misura dell'olio, la quale ha portato alla luce dei dati che eccedevano di molto rispetto i limiti imposti dalla normativa descritta nei capitoli precedenti.

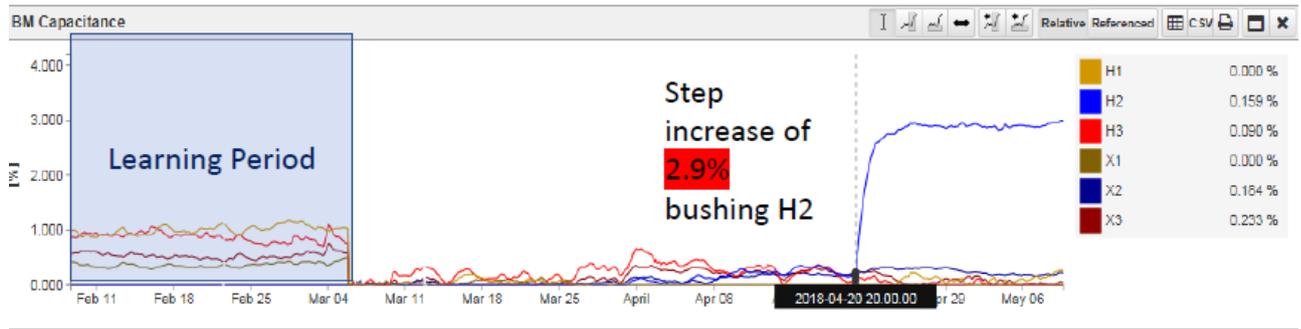


Figura 4.1.8. Caso reale di incremento repentino della capacità

Determinare la causa per la quale si verifica un incremento repentino della capacità non è facile. La pratica ha portato l'azienda a definire un nuovo parametro denominato "HE" dall'acronimo inglese "High Energy Event". L'HE consente di tener conto di fenomeni ad alto contenuto energetico che si verificano all'interno del passate; è associato a eventi di scarica elettrica dovuta ad elementi flottanti e non a scariche parziali.

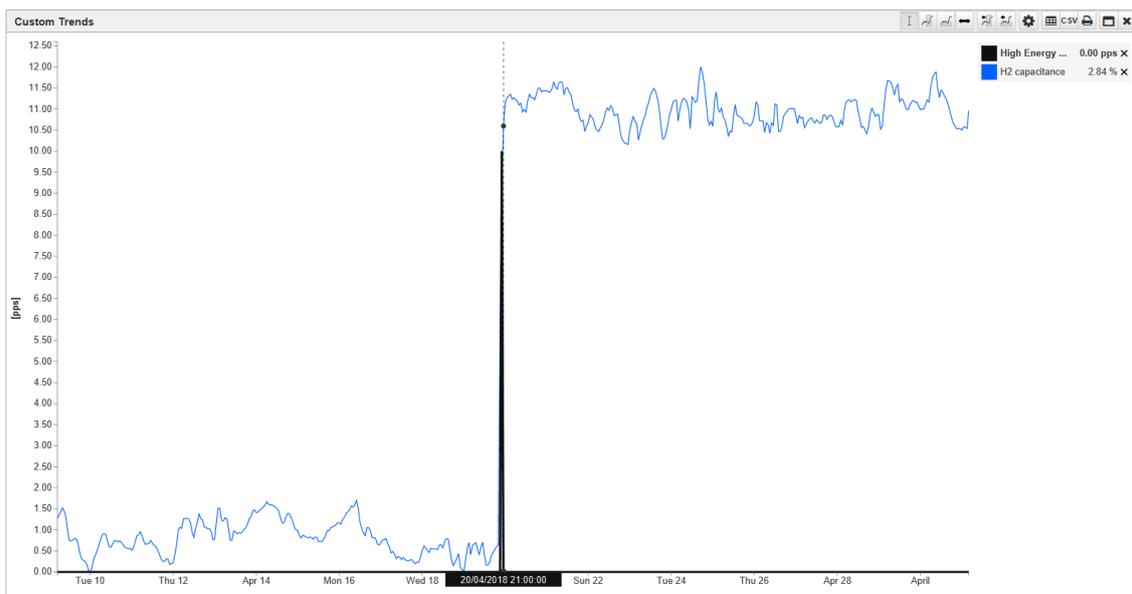


Figura 4.1.9. Fenomeni HE nel caso reale di guasto.

I pattern delle scariche parziali permettono di osservare bene i fenomeni ad alto contenuto energetico. Nella figura che segue è mostrato il pattern della fase interessata durante il possibile guasto. I piccoli punti situati esternamente alla forma d'onda sinusoidale della tensione rappresentano gli eventi "HE". L'ampiezza associata a questi fenomeni è di circa 20 volt in valore assoluto. Al verificarsi della sovratensione corrisponde un evento energetico consistente non associabile ad una scarica parziale.

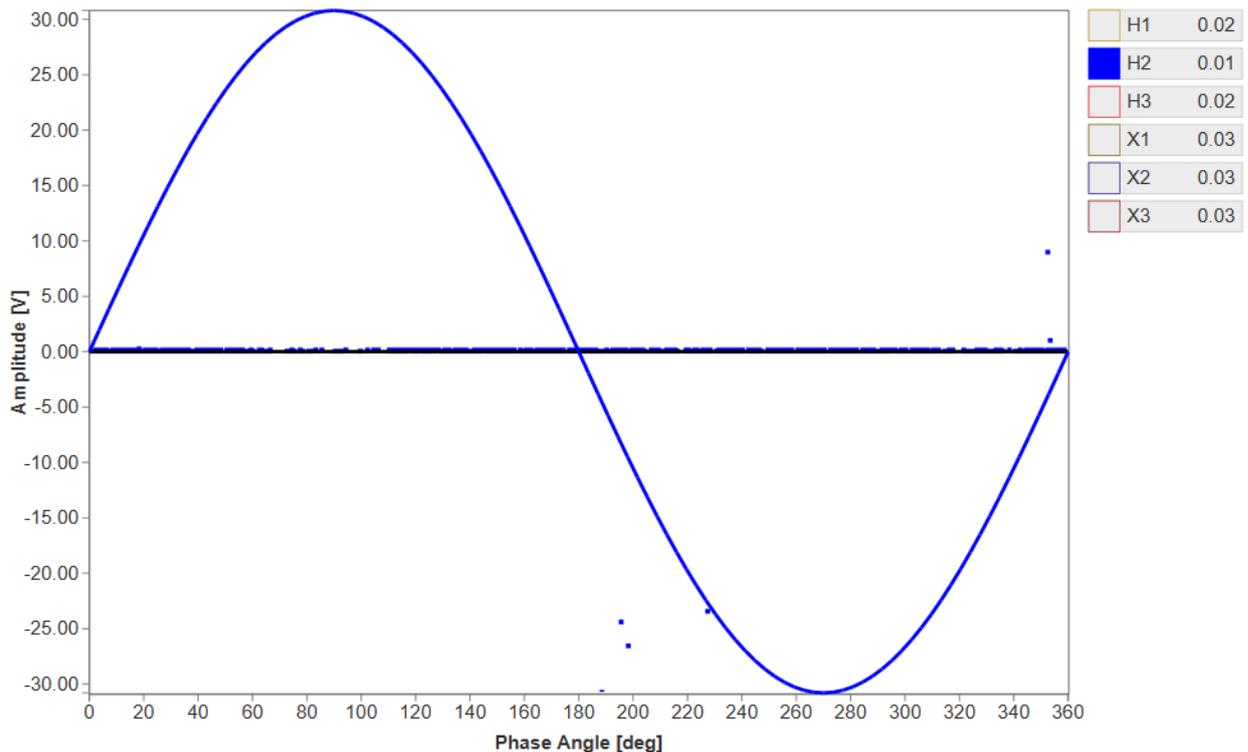


Figura 4.2.0. Fenomeno di scarica ad alto livello di energia

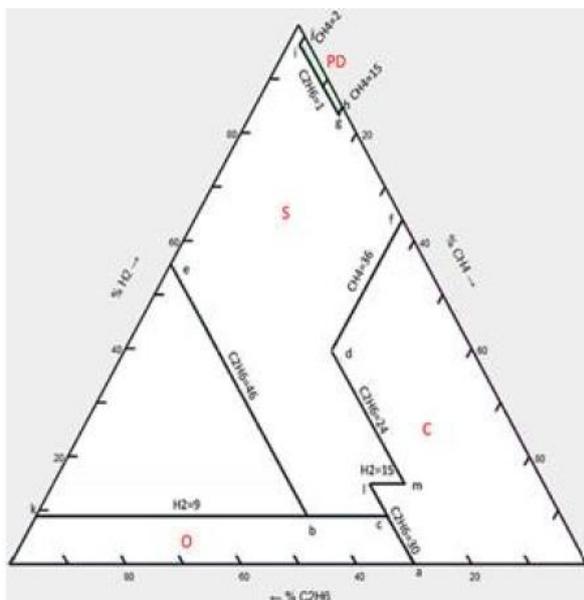
L'azienda2 fornisce un ottimo supporto offline per l'analisi completa delle apparecchiature dove il sistema di monitoraggio online è montato. Oltre ai parametri descritti ampiamente nell'elaborato permette di analizzare le misure dei gas disciolti nell'olio del trasformatore. La visualizzazione dei dati relativi ai gas disciolti avviene in due modi distinti:

- 1- Andamenti grafici;
- 2- Triangolo di Duval;

Il triangolo di Duval utilizza i gas formati da difetti che si verificano ad alta e bassa energia al fine di ottenere informazioni utili riguardo al guasto nel servizio. Esistono varie tipologie di triangolo in relazione al gas utilizzato. Ad esempio, il triangolo che usa come riferimento:  $H_2$ ,  $CH_4$  e  $C_2H_6$  è usato per distinguere:

- Gassificazione dell'olio per temperatura minori di 200 °C in zona S;
- Individuazione di punti caldi, in zona O, per "cottura" della carta e non per carbonizzazione;
- Possibile carbonizzazione della carta per temperature superiori ai 300 °C in zona C;
- Individuazione di fenomeni di scariche parziali;

Un esempio generico è riportato in figura:



Dalla figura si vuole evidenziare le zone S, O e PD descritte precedentemente. La presenza di più punti in queste zone è indice di guasto.

Figura4.2.2. Generico triangolo di Duval

Nel caso specifico i “DGA TRENDS” mostrano gli andamenti della concentrazione dei gas disciolti nel trasformatore. Il triangolo di Duval si basa su tre gas chiave: C2H2, C2H4 e CH4. I risultati delle concentrazioni orarie di gas sono posizionati nel triangolo fornendo indicazioni utili di diagnostica. Ogni Concentrazione di gas può essere nascosta o visualizzata singolarmente tramite le apposite caselle sulla destra. Inoltre, è possibile aggiungere dei widget per creare una dashboard personalizzata al fine di un confronto dettagliato tra i gas

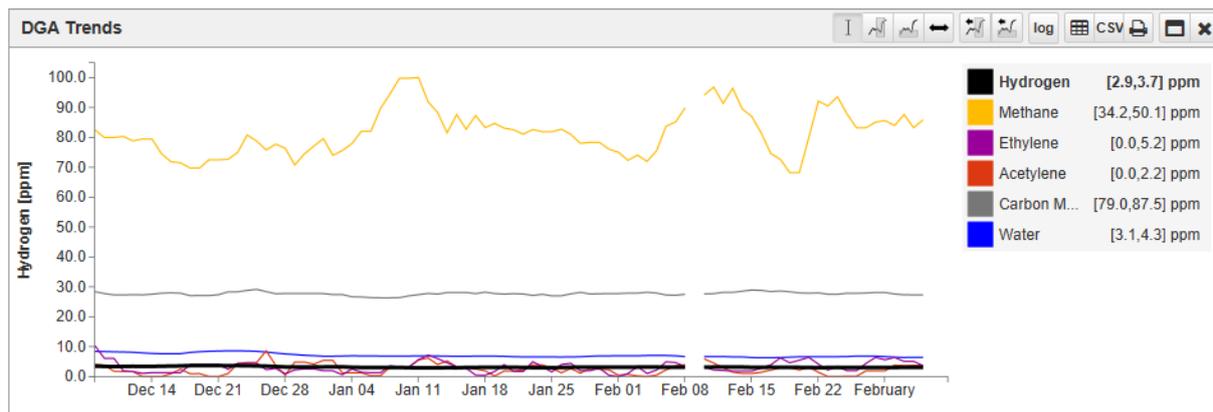


Figura 4.2.3.Andamenti gas disciolti

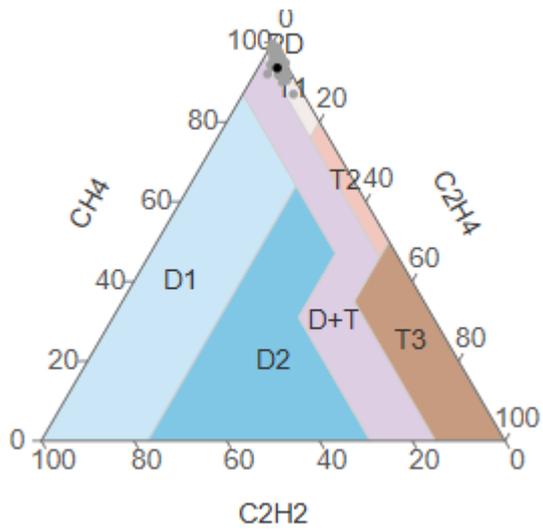


Figura 4.2.4. Triangolo di Duval trasformatore 3

Da questi due grafici si mostra come nessun valore di gas disciolto supera i valori ppm imposti dalla norma. Anche dall'analisi del triangolo di Duval non si evidenziano punti a rischio per il trasformatore.

### 4.2.3. Azienda3

L'azienda3 fornisce una presa capacitiva avente le seguente configurazione:



Figura 42.5. Modello fisico della presa capacitiva

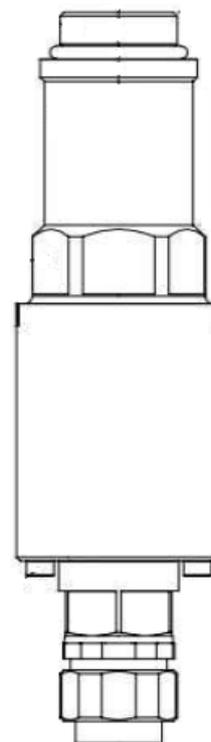


Figura 4.2.6. Struttura completa presa capacitiva.

Anche in questo caso il connettore fornito è composto da tre parti principali: adattatore, corpo e la testa. Nel corpo sono contenuti gli elementi elettrici e meccanici principali quali: due resistenze per la misura della corrente, due diodi zener per la protezione dalle sovratensioni. Rispetto al caso precedente non è presente alcuna finestra che mostra la corretta connessione del PIN con il passante. I vari elementi vengono collegati tra loro attraverso una filettatura che ne garantisce il serraggio. Non sono presenti dispositivi per la misura ad alta frequenza poiché quest'ultimi si trovano nel vano contenente la CPU. Il principio di montaggio è indicato dall'azienda costruttrice la quale definisce il test d'integrità del circuito dell'adattatore del bushing. La procedura che deve essere eseguita è la seguente:

Innanzitutto, ci si accerta che il riferimento di potenziale coincida sia per il passante che per l'adattatore capacitivo. In seguito, si rimuovono i coperchi degli adattatori e si posiziona l'anello più piccolo sull'estremità dell'adattatore. Si applica uno strato di grasso conduttivo anti-grippante ad alta temperatura (solitamente grasso conduttivo in carbonio) sulla filettatura alla base del corpo del sensore. Si elimina successivamente il grasso in eccesso. Il corpo del sensore è collegato all'adattatore attraverso una filettatura e il serraggio avviene a mano senza la

necessità di pinze dinamometriche. Dopo questa fase la prima verifica consiste nel misurare la resistenza tra il corpo dell'adattatore e il passante la quale deve essere inferiore a  $5 \Omega$ . Il percorso conduttivo può essere migliorato rimuovendo della vernice nel passante o modificando il punto di messa a terra in modo che la continuità di terra possa essere testata tra il nuovo punto e l'adattatore del passante. Il passo successivo è quello di serrare l'adattatore alla coppia richiesta definita dal costruttore. Il serraggio avviene con incrementi di 20Nm fino a raggiungere il requisito di coppia finale per ridurre al minimo le sollecitazioni meccaniche. Rimosso il coperchio superiore dell'adattatore si installa un raccordo a tenuta di liquido nel coperchio utilizzando un'opportuna guarnizione ermetica. Successivamente si infila l'estremità del condotto metallico a tenuta stagna e il cavo coassiale nel raccordo e si posiziona l'anello esterno sul coperchio superiore. Successivamente si collega il cavo coassiale.

Il collegamento dei cavi coassiali deve rispettare le seguenti indicazioni fornite dal costruttore:

1. È necessario far passare i cavi coassiali attraverso i condotti metallici di ciascun adattatore del passante fino all'armadio contenente il sistema di acquisizione dati.
2. Sul lato dell'involucro i cavi coassiali devono passare attraverso i raccordi del connettore verso la parte inferiore dell'involucro. Ogni cavo deve essere identificato attraverso un opportuno codice.
3. Tutti i cavi coassiali devono essere collegati all'adattatore del passante su un'estremità e al punto di messa a terra all'interno della custodia sull'altra estremità.

Il corretto collegamento del cavo all'adattatore del passante avviene attraverso semplici step;

La prima parte consiste nell'eliminare circa 30 mm di isolante dal conduttore in modo da separare l'armatura metallica del conduttore stesso. Suddiviso il conduttore in due terminali si collegano due PIN per garantire il collegamento all'interno della presa capacitiva. Queste azioni sono sintetizzate graficamente nella figura.

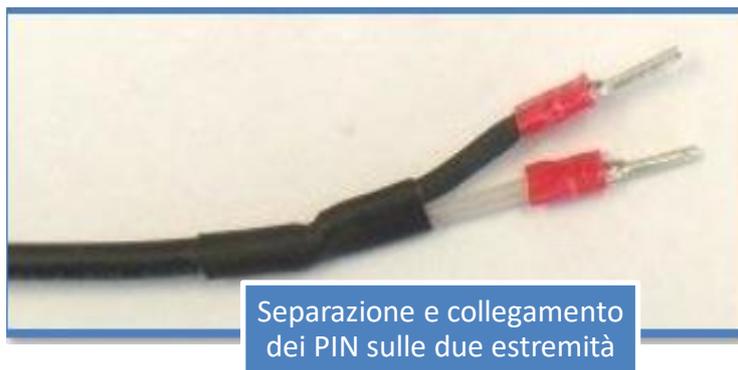
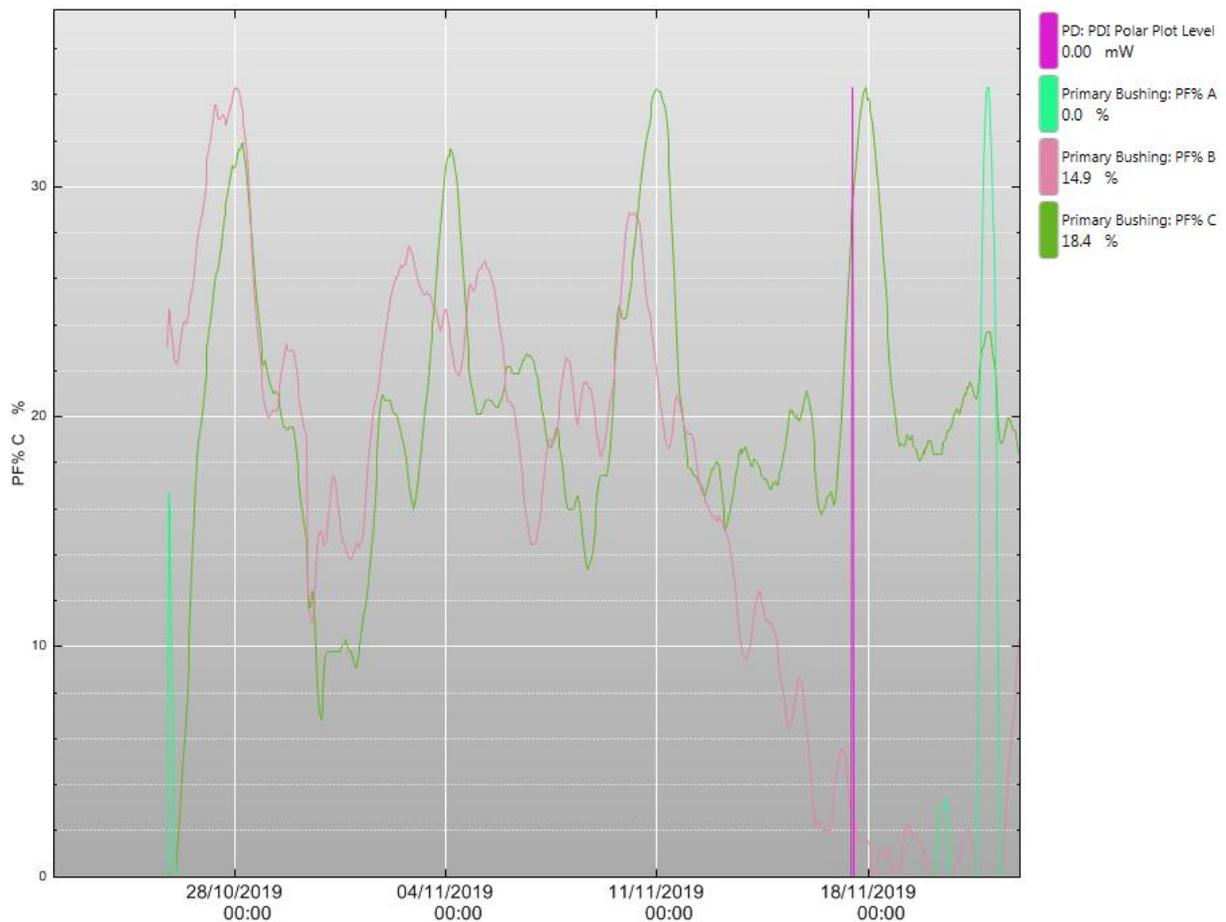


Figura 4.2.7. Fasi di collegamento del cavo coassiale

Terminato il collegamento si procede con la chiusura dell'involucro e il serraggio attraverso cinque viti che comprimono uniformemente l'anello di tenuta. Bisogna accertarsi che tutto sia stato assemblato correttamente poiché l'ingresso di acqua può provocare guasti catastrofici all'intero sistema.

Anche in questo caso il software alla base del sistema di acquisizione dati si focalizza sull'implementazione matematica di medie ottenute acquisendo ad intervalli regolari valori di corrente in modulo e in fase. Analogamente vengono forniti dei grafici associati alle grandezza da esaminare quali: capacità e  $\tan(\delta)$ . È mostrato in figura l'andamento del fattore di potenza misurato da quest'ultimo sistema descritto.



**Figura 4.2.8. Andamento fattore di potenza trasformatore azienda3**

Le misurazioni PF% vengono calcolate in base alle misurazioni dell'angolo di fase del passante e agli angoli di fase previsti presentati nella scheda impostazioni del passante.

- Il PD massimo visualizzato in questa pagina è il valore PD massimo per il ciclo. Il file di registro PD Max è il valore massimo del PD mediato su ciascun ciclo. Questo PD Max viene aggiornato ogni 2 secondi.
- PD (pC) è l'ampiezza (carica apparente) dell'evento PD.
- Conteggio PD è il numero di eventi di scarica parziali per ciclo

- PDI (mW) è la potenza media associata a un evento PD (come definito nella norma IEC 60270)

Per garantire una corretta analisi del fattore di potenza il grafico precedente racchiude tutti i valori misurati nell'arco temporale di un mese. Si evidenzia l'andamento oscillatorio e poco variabile rispetto al valore di riferimento. Durante le prime due settimane di analisi la fase che più si avvicina al valore nominale del passante è la fase A. Quest'ultima diventa il riferimento per la fase B e C. In seguito, la fase A si scambia con la fase C per poi tornare ad essere il riferimento nominale. Il discostamento tra gli andamenti è sicuramente dovuto a fluttuazioni del carico per fase e non a guasti poiché non si evidenziano variazioni repentine e costanti di  $\tan(\delta)$  in tempi brevi. Un modo efficace per individuare un guasto associato ad una variazione del fattore di potenza è quello di analizzare uno dei grafici fornito dal software che mostra lo sfasamento angolare delle fasi rispetto al riferimento.

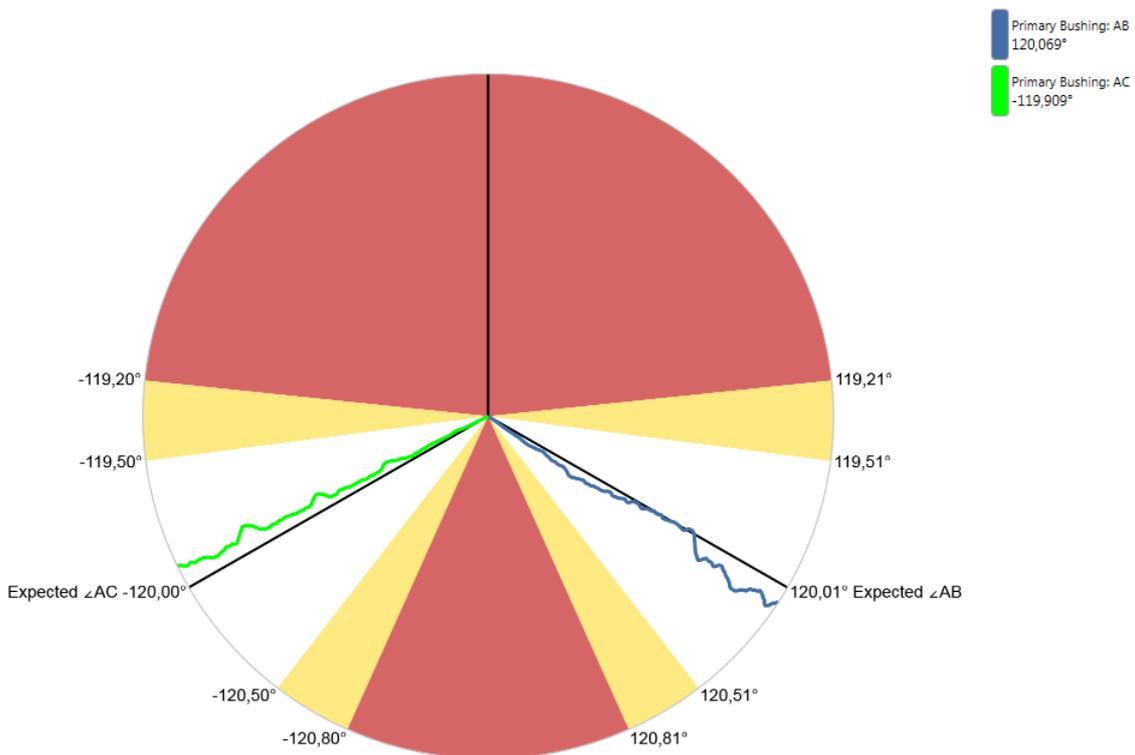


Figura 4.2.9. Sfasamento angolare tra le fasi.

Il grafico mostra lo sfasamento angolare AB e AC mentre l'angolo compreso tra la fase B e C viene calcolato dal sistema come semplice somma aritmetica ricordando che:

$$\widehat{AB} + \widehat{AC} + \widehat{CB} = 360^\circ$$

Un guasto che incrementa il fattore di potenza nel passante si evince dal grafico quando una fase tende a distanziarsi dal riferimento di 120° in maniera crescente e continua nel tempo. Questo significa, ad esempio, che un guasto relativo alla fase B si vede bene se lo sfasamento AB rispetto al riferimento aumenta e complementariamente lo sfasamento AC diminuisce della stessa quantità. Il guasto si presenta quando questo incremento è significativo e non oscillatorio. L'andamento dello sfasamento AB mostrato in figura è indice di fluttuazione di carico o eventi atmosferici quali: umidità.

Tutti i dati rilevati dall'apparecchiatura vengono raggruppati in un'opportuna tabella per facilitarne l'analisi.

BMT M03 TG									
From: 01/11/2019		To: 22/12/2019		Reset Dates					
Timestamp	PD: PDI Polar Plot Level (mW)	Primary Bushing: C1% A (%)	Primary Bushing: C1% B (%)	Primary Bushing: C1% C (%)	Primary Bushing: C1% Polar Plot Level (%)	Primary Bushing: PF% A (%)	Primary Bushing: PF% B (%)	Primary Bushing: PF% C (%)	
02/12/2019 09:12:40									
02/12/2019 09:12:39									
02/12/2019 08:47:32	0.00	-14.0	-14.2	-13.2	0.9	0.0	13.0	26.7	
02/12/2019 08:42:47									
02/12/2019 08:42:46									
02/12/2019 07:47:32	0.00	-13.8	-13.9	-12.9	0.9	0.0	13.6	26.8	
02/12/2019 06:47:32	0.00	-13.2	-13.3	-12.3	0.9	0.0	14.1	27.2	
02/12/2019 05:47:32	0.00	-12.7	-12.9	-11.9	0.9	0.0	14.4	27.4	
02/12/2019 04:47:32	0.00	-13.9	-14.0	-13.0	0.9	0.0	14.9	27.3	
02/12/2019 03:47:32	0.00	-13.9	-14.0	-13.0	0.9	0.0	15.7	27.0	
02/12/2019 02:47:32	0.00	-13.9	-13.9	-13.0	0.9	0.0	16.5	27.0	
02/12/2019 01:47:31	0.00	-13.9	-13.9	-12.9	1.0	0.0	17.3	26.7	
02/12/2019 00:47:31	0.00	-13.4	-13.5	-12.5	0.9	0.0	17.9	26.4	
01/12/2019 23:47:32	0.00	-13.6	-13.7	-12.7	0.9	0.0	18.5	26.3	
01/12/2019 22:47:31	0.00	-13.7	-13.8	-13.0	0.8	0.0	19.2	26.2	
01/12/2019 21:47:31	0.00	-13.5	-13.6	-12.7	0.8	0.0	20.0	25.9	
01/12/2019 20:47:31	0.00	-13.6	-13.7	-12.8	0.8	0.0	20.8	25.6	
01/12/2019 19:47:31	0.00	-13.4	-13.6	-12.6	0.9	0.0	21.5	25.5	
01/12/2019 18:47:31	0.00	-13.4	-13.5	-12.6	0.8	0.0	21.9	25.1	
01/12/2019 17:47:31	0.00	-13.1	-13.2	-12.4	0.8	0.0	22.3	24.9	
01/12/2019 16:47:31	0.00	-12.6	-12.8	-11.9	0.8	0.0	22.5	24.6	
01/12/2019 15:47:31	0.00	-13.0	-13.2	-12.3	0.8	0.0	23.0	24.6	
01/12/2019 14:47:31	0.00	-13.7	-13.8	-12.9	0.9	0.0	23.7	24.4	
01/12/2019 13:47:31	0.00	-14.1	-14.1	-13.2	0.9	0.0	24.7	24.1	
01/12/2019 12:47:31	0.00	-14.0	-14.0	-13.1	0.9	0.0	25.5	23.6	
01/12/2019 11:47:31	0.00	-13.8	-13.8	-12.9	0.9	0.0	26.5	23.4	
01/12/2019 10:47:31	0.00	-13.3	-13.3	-12.4	0.9	0.0	27.3	23.2	

Figura 4.3.0. Tabella capacità e tan(δ).

I dati raccolti permettono di quantificare istante per istante ogni parametro associato ai passanti del trasformatore. Oltre ai grafici già forniti è possibile costruire dei grafici tramite Excel

utilizzando nel dettaglio i valori numerici acquisiti. L'utilizzo del programma di calcolo è un sistema aggiuntivo per la corretta valutazione dei valori ottenuti.

I grafici polari sono un'altra rappresentazione dettagliata che mostrano quali proprietà del passante stanno variando. Fisicamente rappresenta la somma vettoriale dei tre fenomeni differenziali, qualsiasi evento di modo comune colpisca il passante sarà negato. In ogni istante la grandezza esaminata sarà la percentuale della differenza rispetto al valore di riferimento. L'evoluzione nel tempo è dimostrata dal colore del vettore nel grafico.

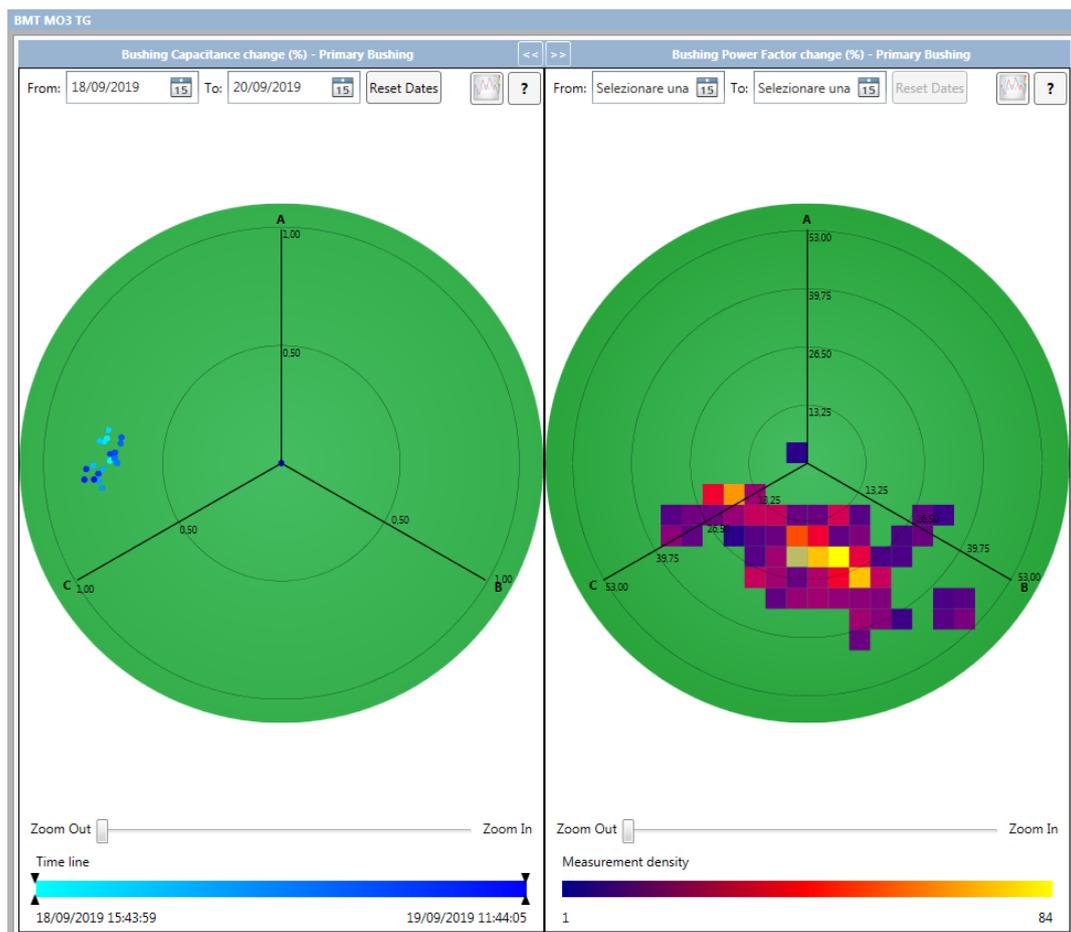


Figura 4.3.1. Grafico polare

Il sistema prevede due diverse modalità di gestione dell'allarme. Nel caso della capacità i criteri allarmanti sono:

Variazione delta del 5% dal valore di targa:

- Passante accettabile – Nessun avviso di allarme.

Variazione delta tra il 5% e il 10% dal valore di targa:

- Passante da visionare da vicino - Avviso Allarme attivato.

Variazione delta del 10% e superiore rispetto al valore di targa:

- Condizioni gravi del passante - Livello di allarme attivato

Nel caso del fattore  $\tan(\delta)$  i criteri allarmanti sono:

Variazione delta del 150% dal valore di targa:

- Passante accettabile – Nessun avviso di allarme.

Variazione delta tra il 150% e il 200% dal valore di targa:

- Passante da visionare da vicino - Avviso Allarme attivato

Variazione delta del 200% e superiore rispetto al valore di targa:

- Condizioni gravi del passante - Livello di allarme attivato.

## Conclusioni

L'obiettivo preposto nel presente elaborato è quello di individuare la strumentazione più efficiente per la valutazione dello stato di salute dei passanti alta tensione dei trasformatori. I tre sistemi si caratterizzano per elementi molto simili tra loro e la scelta tecnico-economica non è di certo facile. In questo testo si è preferito descrivere dettagliatamente le tre apparecchiature nel loro complessivo: struttura hardware, software e widget aggiuntivi. La valutazione del miglior sistema non è associabile all'accuratezza con la quale vengono forniti i dati poiché; ognuno garantisce margini di errori minimi rispetto al valore di riferimento. In realtà ogni sistema effettua un periodo di learnig dove si confrontano effettivamente i valori registrati con quelli inseriti nel software (Dati di targa o misurazioni offline.) Non usando sensori di tensioni per la determinazione dell'angolo di sfasamento tra la tensione e la corrente, l'algoritmo alla base del calcolo del  $\tan(\delta)$  è lo stesso per le tre apparecchiature. L'utilizzo di soli tre sensori di corrente piuttosto che sei sensori garantisce un risparmio economico non indifferente. L'utilizzo di sensori di tensione permette, sicuramente, la misura esatta dello sfasamento ma il risultato ottenuto coincide, nella pratica, con quello determinato attraverso l'algoritmo. La struttura Hardware dei tre sistemi di monitoraggio online è composta sempre da quattro macro-unità fondamentali: Presa capacitiva, cavi di collegamento, sistema di comunicazione wireless e processore di acquisizione e calcolo dei dati. Ogni azienda produce la propria presa capacità, la quale è composta sempre da resistenze di misura e da dispositivi di protezione. Le prime differenze si hanno, comunque all'interno della presa; nel primo caso la struttura è sicuramente quella che garantisce il più alto valore di sicurezza per fenomeni di sovratensioni. Come già descritto, sono previsti una serie di dispositivi limitatori che mantengono i livelli di tensione sotto i limiti prestabili. La ridondanza del sistema è garantita per ogni dispositivo presente nel sensore. In aggiunta, rispetto agli altri dispositivi, è presente uno Shorting Block automatico tra il sensore del passante e il sistema di misura garantendo una protezione aggiuntiva che separa efficacemente le due parti. La costruzione dell'involucro dipende dal tipo di passante e il collegamento della presa avviene tramite semplice serraggio. Il trasferimento dei segnali tra il sensore e il processore avviene tramite semplice cavo coassiale. L'azienda<sup>2</sup> fornisce una presa capacitiva molto più innovativa. Oltre ai classici dispositivi di misura e di protezione, minori rispetto al caso precedente, è presente un trasformatore amperometrico per le misure ad alta frequenza. La presenza di questo elemento all'interno della presa permette una misura molto più precisa dei fenomeni di scarica parziali interni al passante. La conformazione fisica della presa è standardizzata e quindi producibile in blocco. Il corpo del sensore non è cilindrico ma

rettangolare e di piccole dimensioni permettendo una facile installazione con l'adattatore fisso posto nell'isolatore passante. Inoltre, il collegamento con la testa non avviene tramite serraggio a vite ma con un semplice incastro. Un altro elemento che facilita la corretta installazione del dispositivo è una piccola finestrella nell'involucro del sensore che mostra l'effettiva connessione con il PIN. Nel terzo caso preso in esame la struttura della presa è cilindrica e sono presenti un numero limitato di dispositivi di protezione. È sempre garantita la ridondanza del sistema ma non vi è alcun accorgimento aggiuntivo per limitare fenomeni di guasto. Il trasformatore amperometrico necessario per la misura dei fenomeni ad alta frequenza non si trova internamente al sensore ma direttamente nell'armadio contenente il sistema di acquisizione dati questo può comportare un errore sulla misura ma nella pratica gli errori di modo differenziale che si verificano sono del tutto trascurabili. La conformazione fisica di quest'ultimo sensore è sempre suddivisa in tre parti, ma la struttura cilindrica allungata potrebbe creare problemi durante l'installazione nei passanti. Lo studio svolto ha portato a considerare il miglior sensore quello che rispecchiava i requisiti di:

- Affidabilità della misura con errori inferiori allo 0.1%;
- Ridondanza del sistema di misura;
- Sistemi di protezione;
- Facilità di installazione;
- Facilità di smontaggio per le misure offline;
- Materiale dell'involucro.

Come già descritto precedentemente i sensori presentano delle caratteristiche tecniche uguali nella pratica. La maggior sicurezza e la possibilità di un'installazione semplice permettono al dispositivo fornito dall'azienda1 di essere il più efficace ed efficiente tra i tre.

L'individuazione del miglior sistema di analisi non dipende soltanto dalla struttura del sensore ma dal sistema complessivo che viene fornito. Un punto nettamente a sfavore per l'azienda1 è l'impossibilità di effettuare misure ad alte frequenze, ciò comporta che non è possibile discriminare un guasto dovuto a fenomeni di scarica parziali nel passante. L'azienda2 garantisce un'ottima misura di questi fenomeni non solo grazie al TA disposto nel sensore ma anche attraverso ai molti metodi di discriminazione forniti dal software offline quali: Persistenza delle scariche parziali, andamento degli stati, triangolo delle scariche parziali, legenda degli stati, ampiezza e matrice degli stati.

Analogamente la terza struttura esaminata presenta metodi efficaci per la misura di questi elementi.

Fattore determinante dell'acquisto di un'apparecchiatura rispetto all'altra è la possibilità di correlare altri dispositivi di misura per determinare lo stato di salute complessivo della macchina. Un unico sistema capace di diagnosticare lo stato di salute della macchina determinando:

- Capacità,  $\tan(\delta)$  e scariche parziali negli isolatori passanti;
- Tecnica DGA per la misura dei gas disciolti nell'olio del trasformatore;
- Temperatura massima nella macchina;
- Picchi massimi di corrente durante il normale esercizio;
- Condizioni ambientali;

Rappresenta l'apparecchiatura di acquisizione online migliore. In ogni sistema analizzato è possibile correlare anche le grandezze descritte precedentemente ma momentaneamente soltanto l'azienda<sup>2</sup> fornisce, tramite il software offline, la completa analisi della macchina previa installazione dei rispettivi sensori.

L'attività svolta ha portato come conclusione l'affermazione della struttura fornita dall'azienda<sup>2</sup> come la migliore. La scelta non dipende dalla affidabilità del sistema, poiché ogni misurazione ha rispettato i canoni previsti, ma dagli accorgimenti aggiuntivi che rendono tutto il sistema più efficiente. La facilità e l'accuratezza di correlare tutti i fenomeni che si verificano nel trasformatore rappresenta quella marcia in più che ne determina l'acquisto finale. Si vuole far notare che il confronto è avvenuto in maniera tecnica e analitica e non dal punto di vista strettamente economico poiché non è stato possibile avere come riferimenti i dati di acquisto delle rispettive aziende produttrici.

## **Bibliografia e sitografia**

**ANALYSIS AND LOCATION OF PARTIAL DISCHARGES IN POWER** [Rivista] / aut. H Tatizawa G F Burani.

**Analysis of Partial Discharge in OIP Bushing** [Rapporto] / aut. Ahmed Zeeshan.

**Atti di convegno** [Atti di convegno] / aut. tensione Aziende produttrici passanti Alta.

**Bushing sensor and their role in reliable on-line bushings monitorings** [Rivista] / aut. tostrud Mark.

**COMPARISON OF METHODS FOR THE DISSIPATION FACTOR** [Rivista] / aut. S. Kornhuber S. Markalous, M. Muhr, T. Strehl, C. Sumeder.

**Condition Monitoring** [Rapporto] / aut. Azienda1.

**Design-Dependent Slot Discharge and Vibration Sparking** [Rivista] / aut. Liese Manfred.

**Dissipation factor** [Rivista] / aut. Hernandez-Mejia Jean Carlos.

**Dissolved Gas Analysis** [Rivista] / aut. Hamrick Lynn.

**Fundamentals of condenser bushings** [Rivista] / aut. magazine Transformer.

**High voltage engineering** [Rapporto] / aut. Holtzhausen.

**IMPROVEMENT OF HEAT DISTRIBUTION IN DAF-30 TYPE BUSHINGS** [Rivista] / aut. Ilim ERDEN Aydogan OZDEMIR\* and Suat ILHAN.

**Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V** [Online] / aut. Norma IEC 60137 Ed 7, 2017-06 // <https://ceimagazine.ceinorme.it/ceifocus/isolatori-passanti/>.

**Manuale operativo 1** [Rapporto] / aut. Azienda1.

**Manuale operativo 2** [Rapporto] / aut. Azienda2.

**Manuale operativo 3** [Rapporto] / aut. Azienda3.

**Manuale tecnico scariche parziali** [Rapporto] / aut. Azienda2.

**New frontiers of DGA interpretation for power transformers and** [Rivista] / aut. Duval Michel.

**ON LINE MONITORING SYSTEMS FOR BUSHINGS** [Rivista] / aut. MIKE Y. LAU TYLER SCHWARTZ, DANNY E. BATES, CLAUDE F. KANE, ALEXANDER A..

**PD Guard user manual** [Rapporto] / aut. 1 Azienda.

**Product catalog e design guide: GDT** [Rapporto] / aut. Littlefuse.

**Specifiche tecniche** [Rapporto] / aut. Azienda1.

**Specifiche tecniche 3** [Rapporto] / aut. Azienda3.

**Specifiche tecniche2** [Rapporto] / aut. Azienda2.

**The Theory and Measurement of partial discharge transients** [Rapporto] / aut. Pedersen A..