



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero della Transizione Ecologica



Ricerca di Sistema elettrico

Studio dell'invecchiamento elettrico di tamponature con accumulo elettrico integrato

Davide Fabiani, Fabrizio Palmieri



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Report RdS/PTR2021/138

Studio dell'invecchiamento elettrico di tamponature con accumulo elettrico integrato

Davide Fabiani e Fabrizio Palmieri (Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione "Guglielmo Marconi", DEI)

Con il contributo di: prof. Leonardo Sandrolini– Università di Bologna

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto 1.5: - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti

Work package 3: Componenti e impianti innovativi per incrementare l'efficienza energetica e l'uso delle fonti rinnovabili negli edifici

Linea di attività 3.22: **Studio dell'invecchiamento elettrico delle tamponature**

Responsabile del Progetto: Ing. Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package: Ing. Biagio Di Pietra, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Caratterizzazione elettromagnetica di tamponature per edilizia con accumulo energetico integrato"

Responsabile scientifico Università di Bologna: prof. Davide Fabiani



Responsabile scientifico ENEA: ing. Marcello Artioli

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 SETUP SPERIMENTALE	5
3 PROVE DI VITA IN CORRENTE CONTINUA	7
4 CARATTERIZZAZIONE CON RIPPLE SUPERIMPOSTO.....	12
4.1 CONSIDERAZIONI PRELIMINARI.....	13
4.2 CARATTERIZZAZIONE CON RIPPLE SUPERIMPOSTO: FREQUENZA 100 HZ	13
4.3 CARATTERIZZAZIONE CON RIPPLE SUPERIMPOSTO: FREQUENZA 1000 HZ	17
4.4 DISCUSSIONE SULLE PROVE DI VITA	22
5 IL CONCETTO DEL TASSO DI INVECCHIAMENTO (AGING RATE).....	23
5.1 DETERMINAZIONE DEL TASSO DI INVECCHIAMENTO IN SOLA CORRENTE CONTINUA	25
5.2 DETERMINAZIONE DEL TASSO DI INVECCHIAMENTO IN REGIME DC+AC	25
5.3 VERIFICA MODELLO MATEMATICO CON I RISULTATI SPERIMENTALI	28
6 CONCLUSIONI.....	29
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	29
8 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	30
9 APPENDICE	30

Sommario

L'invecchiamento dei condensatori utilizzati nei prototipi delle tamponature realizzati nelle linee di attività LA3.17 e LA3.18 di ENEA è stato studiato da un punto di vista sperimentale e modellistico presso il Laboratory of Innovative Materials for Electrical Systems del Dipartimento DEI dell'Università di Bologna. Non essendo stati realizzati un numero sufficiente di campioni le prove di invecchiamento sono state eseguite su film di polipropilene dello stesso tipo di quello utilizzato nei condensatori. Dopo aver identificato i protocolli di prova, sono state realizzate delle prove di invecchiamento elettrico a temperatura ambiente, sia in corrente continua a 4 livelli di tensione, superiori alla tensione nominale per accelerare l'invecchiamento, che con una tensione alternata sovrapposta (ripple) pari al 10% della tensione continua alla frequenza di 100 Hz e 1000 Hz. Dall'analisi statistica dei tempi al guasto si sono ottenuti i modelli di vita per ogni tipo di sollecitazione e il Coefficiente di Voltage Endurance (VEC). Dalle prove si è visto che il VEC in continua è molto elevato, pertanto, il materiale resiste bene alla sollecitazione applicata. Con ripple sovrapposto il VEC cala, soprattutto passando da 100 Hz a 1000 Hz. La vita estrapolata alla tensione di servizio, comunque, rimane molto elevata e ben superiore ai 40 anni minimi richiesti per questo tipo di applicazione. Considerando però che le prove sono state eseguite a temperatura ambiente e la temperatura potrebbe essere un fattore di invecchiamento significativo se supera una certa soglia, si consiglia di installare un sensore di temperatura nel condensatore per evitare che temperature superiori a 60°C possano ridurre l'affidabilità del condensatore. È stato inoltre sviluppato un nuovo modello di vita semplificato per le sollecitazioni DC+AC, validato dai risultati delle prove di vita effettuate. Si è visto che il modello è più accurato a basse sollecitazioni essendo più vicine ai valori di servizio.

1 Introduzione

I condensatori all-film autoripristinanti in polipropilene (PP) hanno un largo utilizzo nelle applicazioni di potenza. In particolare, in corrente alterata (AC) come condensatori da rifasamento per compensare la potenza reattiva induttiva, o come filtri per eliminare armoniche nelle reti elettriche, in corrente continua (DC) trovano impiego per smorzare le oscillazioni di tensione, o ripple, indotte dal convertitore AC/DC o, se di capacità elevata, come sistemi di accumulo di energia elettrostatica.

I condensatori autoripristinanti non sono soggetti a breakdown totale in caso di guasti nell'isolamento: perforazioni dell'isolamento portano alla cosiddetta rigenerazione, cioè la sublimazione della parte di armature interessata dal guasto che si autoesclude dal resto del condensatore. Il condensatore, perciò, continua a funzionare ma con un'area elettrodica più piccola, cosa che fa diminuire la capacità dello stesso. Nel tempo, se i fenomeni di rigenerazione sono intensi a causa delle sollecitazioni applicate, la riduzione di capacità del condensatore può essere significativa; pertanto, è necessario definire un criterio di fine vita per il condensatore. Per condensatori da rifasamento, generalmente, si considera guasto un condensatore la cui capacità è scesa al di sotto del valore di tolleranza fissato (di solito 10-20%) rispetto al valore nominale.

In AC, oltre alla sollecitazione a frequenza industriale (50-60 Hz), per la quale vengono progettati, i condensatori sono spesso soggetti anche ad armoniche generate dai convertitori di potenza che possono innescare fenomeni di scariche parziali che comportano un'attività abnorme di autorigenerazione, con conseguente calo precoce di capacità del condensatore [1, 2]. Tale fenomeno è stato ampiamente studiato verso le fine degli anni '90 e sono stati sviluppati diversi modelli di vita e di invecchiamento in presenza di armoniche [1-7].

Nei condensatori per DC, invece, oltre alla componente continua può essere presente anche un *ripple* alternato, generato dal convertitore AC/DC, di solito a bassa frequenza (inferiore ad 1 kHz), che può costituire una sollecitazione ulteriore per l'isolamento del condensatore, riducendo la vita o l'affidabilità dello stesso. Questo fenomeno, però non è stato particolarmente trattato in letteratura, ma è meritevole di approfondimento, soprattutto per quelle applicazioni in DC che devono essere permanentemente collegate a convertitori AC/DC e DC/AC e che devono avere buona affidabilità.

Poiché i condensatori facenti parte del modello di tamponatura ENEA dovranno essere utilizzati come sistemi di accumulo di energia, saranno prevalentemente soggetti a campi DC e probabilmente a ripple AC a bassa frequenza. Si dovrà verificare che la durata del dielettrico sia almeno pari a 40 anni in caso di sollecitazione DC e che la riduzione di vita dovuta al ripple AC non sia troppo elevata.

Si noti che le prove di vita sono prove distruttive che necessitano di un elevato numero di provini identici per eseguire una statistica dei risultati e sono molto lunghe come durata. Pertanto, i costi e i tempi necessari per realizzare un numero di condensatori congruo per tali prove sarebbero stati elevatissimi. Si è, quindi, deciso di eseguire le prove di vita su campioni rappresentativi del condensatore finale. Nel presente lavoro, pertanto, verrà studiato l'invecchiamento del materiale dielettrico del condensatore sottoposto a campi DC+AC, eseguendo prove di vita su campioni di film in PP per condensatore, simili a quelli integrati nel campione di tamponatura fornito da ENEA.

2 Setup Sperimentale

Le prove di vita vengono eseguite inserendo provini di film di PP fra due elettrodi con profilo pseudo-Rogowski (vedi Fig. 1), collegati in parallelo ad un generatore di alta tensione TREK HV ± 20 kV, in grado di generare sia forme d'onda DC che DC + AC con ampiezza e frequenza modulabili. Le prove di vita sono state eseguite con una cella che permette di testare 12 campioni in parallelo (Fig. 2). Prima sono state eseguite prove a rampa per determinare la rigidità dielettrica (RD) in DC, poi sono state eseguite prove di vita a tensione costante, a 4 livelli diversi, determinando il tempo al guasto di ciascun provino [8]. I risultati,

elaborati, statisticamente mediante la distribuzione di Weibull sono riportati nel paragrafo successivo. Le prove sono state realizzate prima in DC e poi con ripple AC pari al 10% della DC a 2 frequenze, 100 Hz e 1000 Hz.

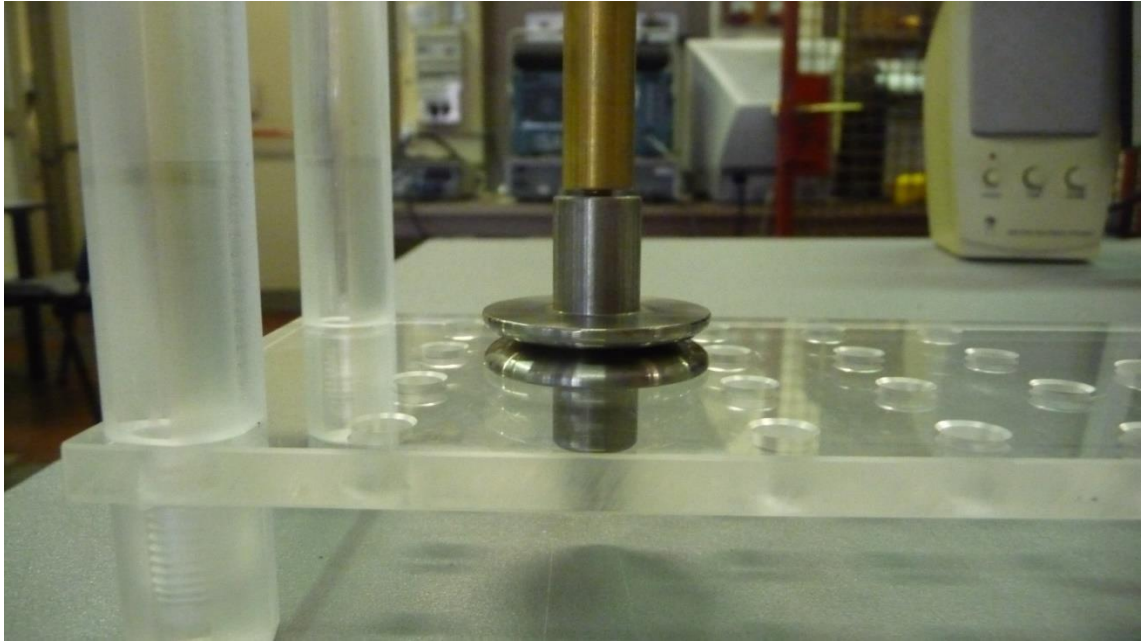


Fig.2.1: Particolare dell'elemento portaprovini. Posizionamento elettrodi.

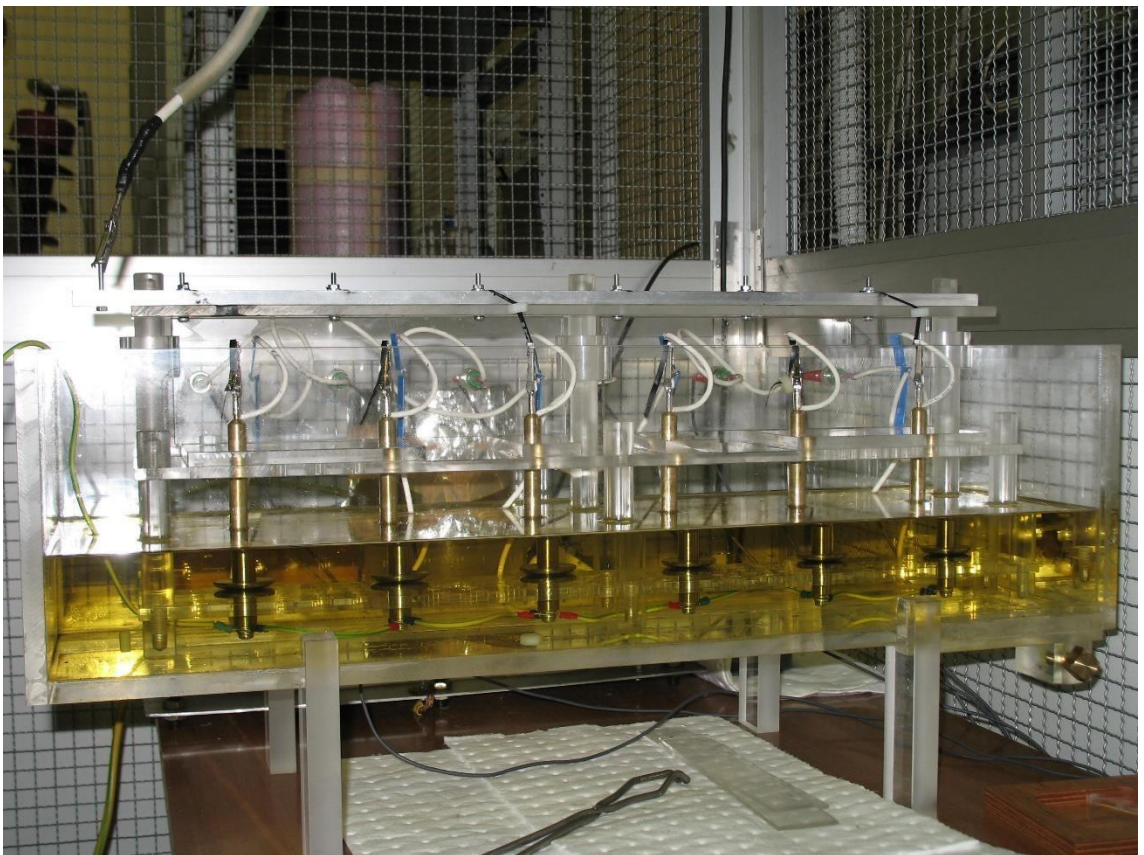


Fig. 2.2 Particolare della vasca contenitiva dell'olio.

3 Prove di vita in corrente continua

Per prima cosa sono state realizzate misure di RD dei film: tale valore di campo, infatti, è il valore massimo ammissibile dal materiale in esame, in altre parole è quel valore di campo produce la scarica istantanea del materiale. Il valore di RD è utile per definire quindi a quali tensioni sarà più opportuno svolgere le prove di vita.

Il valore medio di tensione di scarica (TS) misurato su un lotto di 12 provini è di 18 kV: considerando lo spessore del film di 0.020 mm la RD è di circa 900 kV/mm, valore abbastanza tipico per i film di PP per condensatori.

Prima di procedere con la scelta dei livelli di tensione a cui effettuare le prove di vita, occorre considerare che variazioni modeste nel valore di tensione applicata a valori prossimi al valore di RD producono variazioni piccole nel tempo di vita, mentre variazioni modeste nel valore di tensione applicata a valori distanti dalla RD producono variazioni anche molto grandi nel tempo di vita. In altre parole, la medesima variazione (in valore assoluto) fatta in prossimità del valore di campo critico produce una variazione piccola nel tempo di vita, mentre la medesima variazione ad un valore distante dal valore di campo critico produce una variazione molto grande sul tempo di vita.

Queste considerazioni vanno fatte ai fini della scelta dei valori di tensione a cui svolgere le prove. Occorre effettuare prove di vita accelerate ma che risultino comunque significative; quindi, è bene utilizzare valori di tensione che non siano troppo ravvicinati tra loro per evitare una stima non corretta del modello di vita.

Si può quindi concludere che rispetto al valore della TS, è bene effettuare le prove di vita ai seguenti valori di tensione:

- 70% TS, corrispondente a 12.6 kV;
- 60% TS, corrispondente a 10.8 kV
- 50% TS, corrispondente a 9 kV;
- 40% TS, corrispondente a 7.2 kV.

In questo modo si otterranno, per ciascuna caratteristica, quattro punti nel grafico Tensione-Vita dai quali sarà possibile ottenere il modello di vita.

Di seguito vengono presentati i risultati delle prove di vita in DC realizzati ai 4 livelli di tensione scelti. I risultati dei tempi al guasto, per ogni livello di tensione vengono trattati statisticamente utilizzando la funzione di probabilità di Weibull secondo la Norma IEC [9],

$$F(t_F) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t_F}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (3.1)$$

dove t_F è il tempo al guasto (in secondi o ore) per una data probabilità $F(t_F)$, α è il parametro di scala, cioè il tempo al guasto corrispondente alla probabilità 63.2% e β è il parametro di forma.

Per ogni prova si riporta il grafico dei valori sperimentali in carta di Weibull, con la regressione che rappresenta l'eq. (3.1) e gli intervalli di confidenza inferiore e superiore della regressione; nella tabella si riportano i valori di α e β calcolati dalla regressione, insieme ai rispettivi intervalli di confidenza al 90% e il coefficiente di correlazione R. In particolare, nella Fig. 3.1 e tab. 3.1 sono riportati i risultati delle prove al 70%TS, nella Fig. 3.2 e tab. 3.2 i risultati delle prove al 60%TS, nella Fig. 3.3 e tab. 3.3 i risultati delle prove al 50%TS, nella Fig. 3.4 e tab. 3.4 i risultati delle prove al 40%TS.

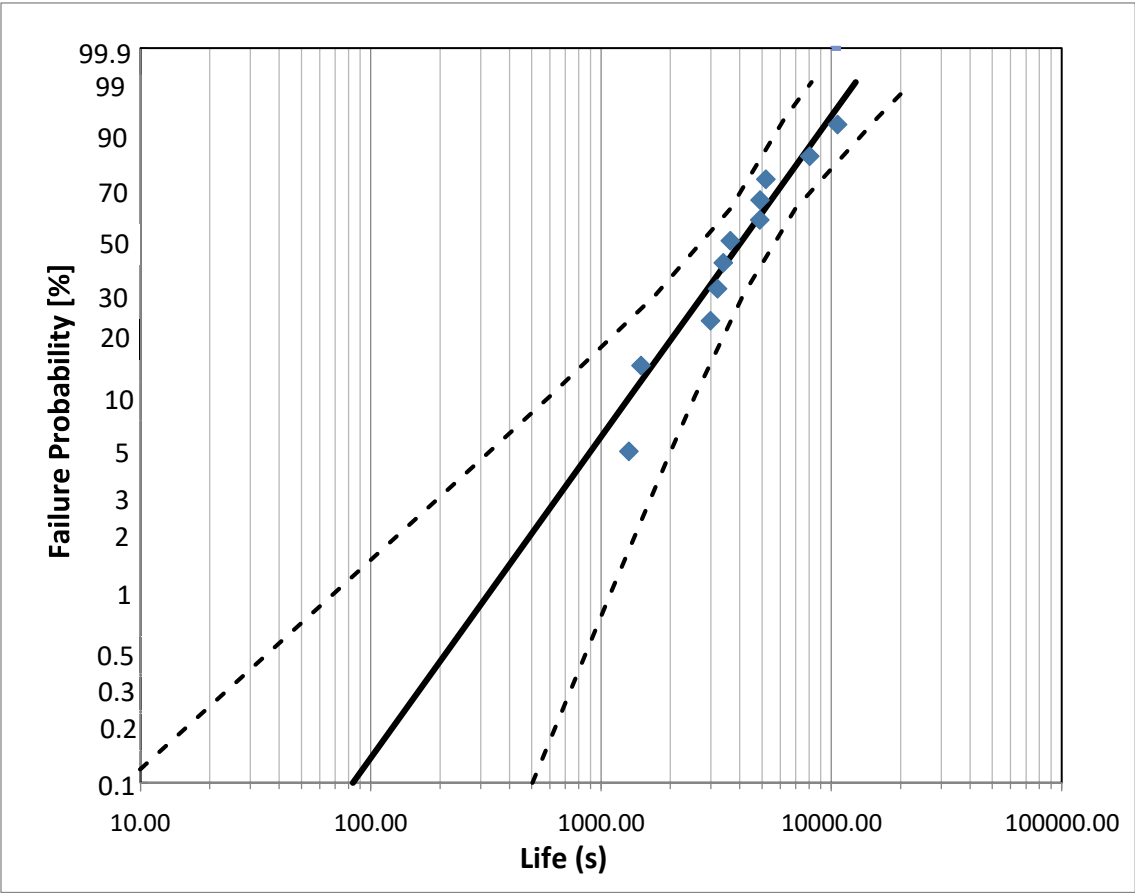


Fig. 3.1: Distribuzione di Weibull dei tempi al guasto al 70% della tensione di scarica.

Tab. 3.1: Parametri statistici della distribuzione in carta di Weibull.

WEIBULL		Intervalli di confidenza	
		Inf (90%)	Sup (90%)
β	1.68	1.09	2.95
α (s)	5134	3641	6964
R	0.97		

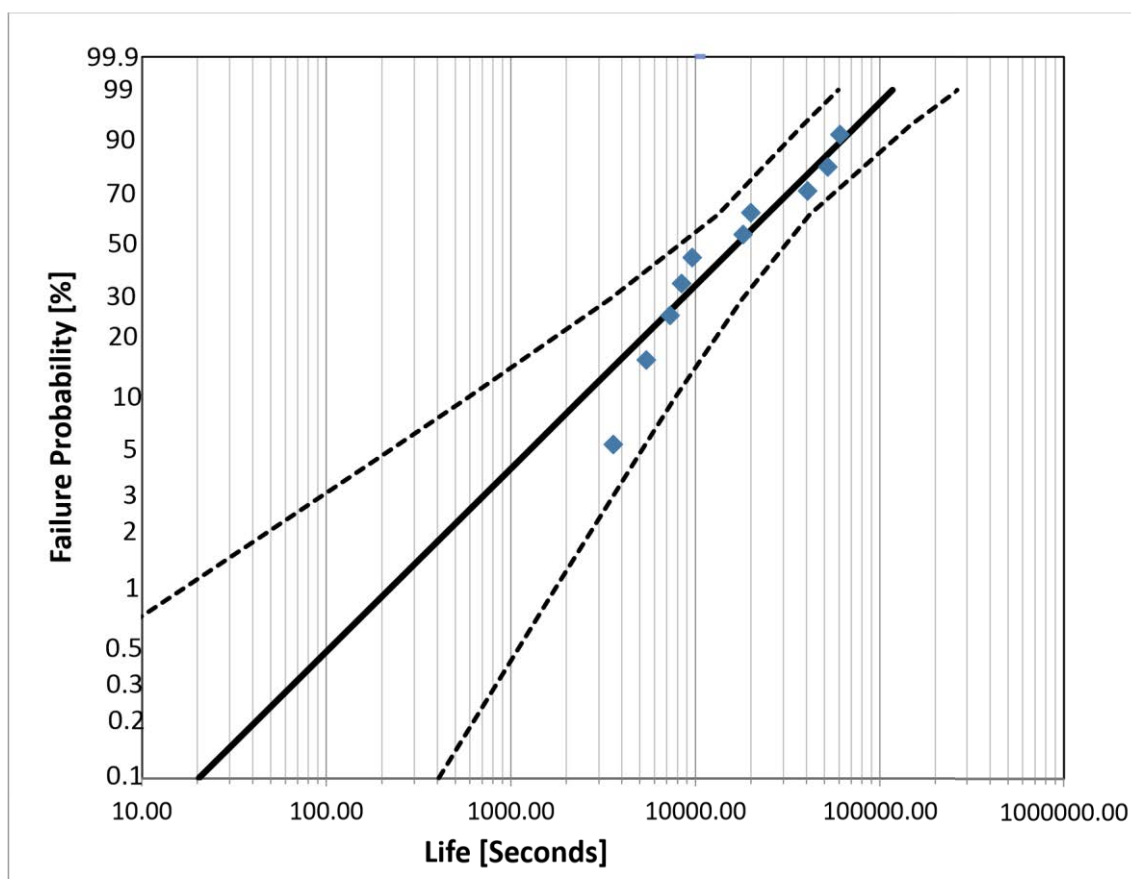


Fig. 3.2: Distribuzione di Weibull dei tempi al guasto al 60% della tensione di scarica.

Tab. 3.2: Parametri statistici della distribuzione in carta di Weibull.

WEIBULL		Intervalli di confidenza	
		Inf (90%)	Sup (90%)
β	0.97	0.65	1.63
α [s]	24422	13306	41658
R	0.95		

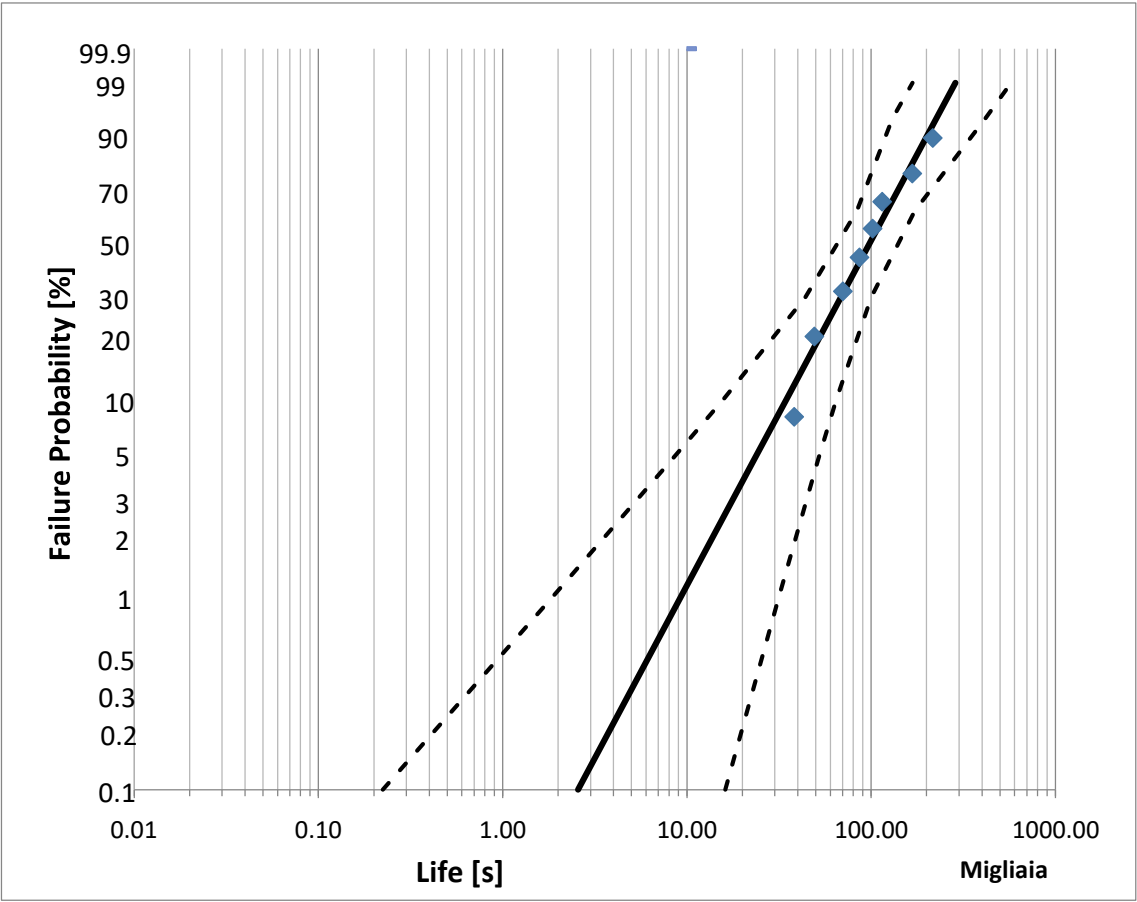


Fig. 3.3: Distribuzione di Weibull dei tempi al guasto al 50% della tensione di scarica.

Tab. 3.3: Parametri statistici della distribuzione in carta di Weibull.

WEIBULL		Intervalli di confidenza	
		Inf (90%)	Sup (90%)
β	1.79	1.08	3.55
α [s]	121897	83740	172157
R	0.98		

Si fa osservare che i tempi di vita per i provini al 40%TS sono risultati molto lunghi (Fig. 3.4), pertanto, come consigliato anche dalle norme, 6 provini sono stati censurati dopo 500h. Ovviamente, l’elaborazione di questi dati con le tecniche del censuramento progressivo hanno fornito risultati non molto accurati data la poca numerosità dei campioni (solo 6 campioni scaricati). Questo fa sì che l’intervallo di confidenza sia piuttosto ampio.

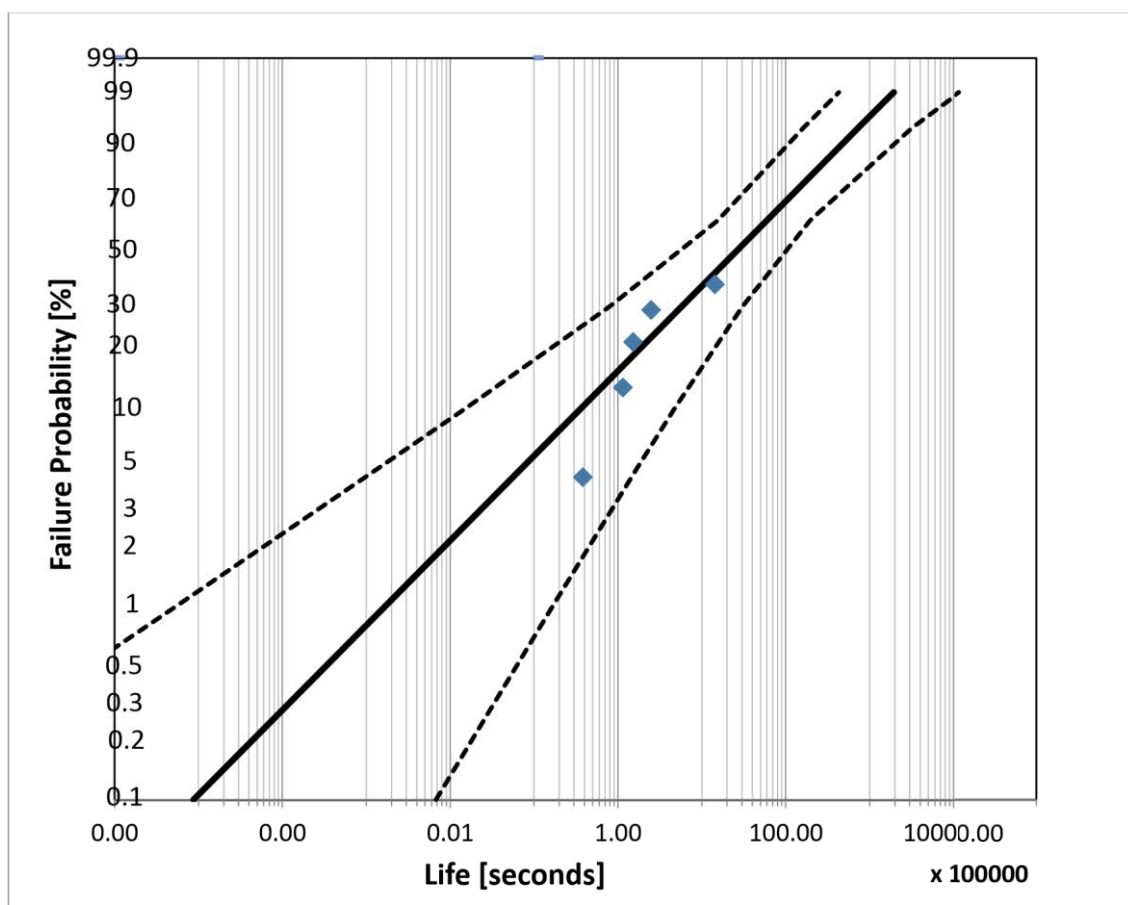


Fig. 3.4: Distribuzione di Weibull dei tempi al guasto al 40% della tensione di scarica.

Tab. 3.4: Parametri statistici della distribuzione in carta di Weibull.

WEIBULL		Intervalli di Confidenza	
		Inf (90%)	Sup (90%)
β	0.44	0.29	0.74
α [s]	5973884	1550882	19554390
R	0.91		

I valori di α , trasformati in ore, in funzione del valore di tensione applicata sono riportati nella tabella riassuntiva 3.5.

Tab. 3.5: Tempo al guasto (valore α della Weibull) in funzione della tensione dc applicata.

Tensione applicata (kV)	Tempo al guasto α (h)
12.6	1.43
10.8	6.78
9.0	33.9
7.2	1659

La Fig. 3.5 riporta i risultati sperimentali delle prove di vita in DC: vengono indicati i punti sperimentali, i parametri α della Weibull, con i rispettivi intervalli di confidenza e la retta di regressione che in coordinate bilogaritmiche rappresenta un modello a potenza inversa riportato nell'equazione seguente:

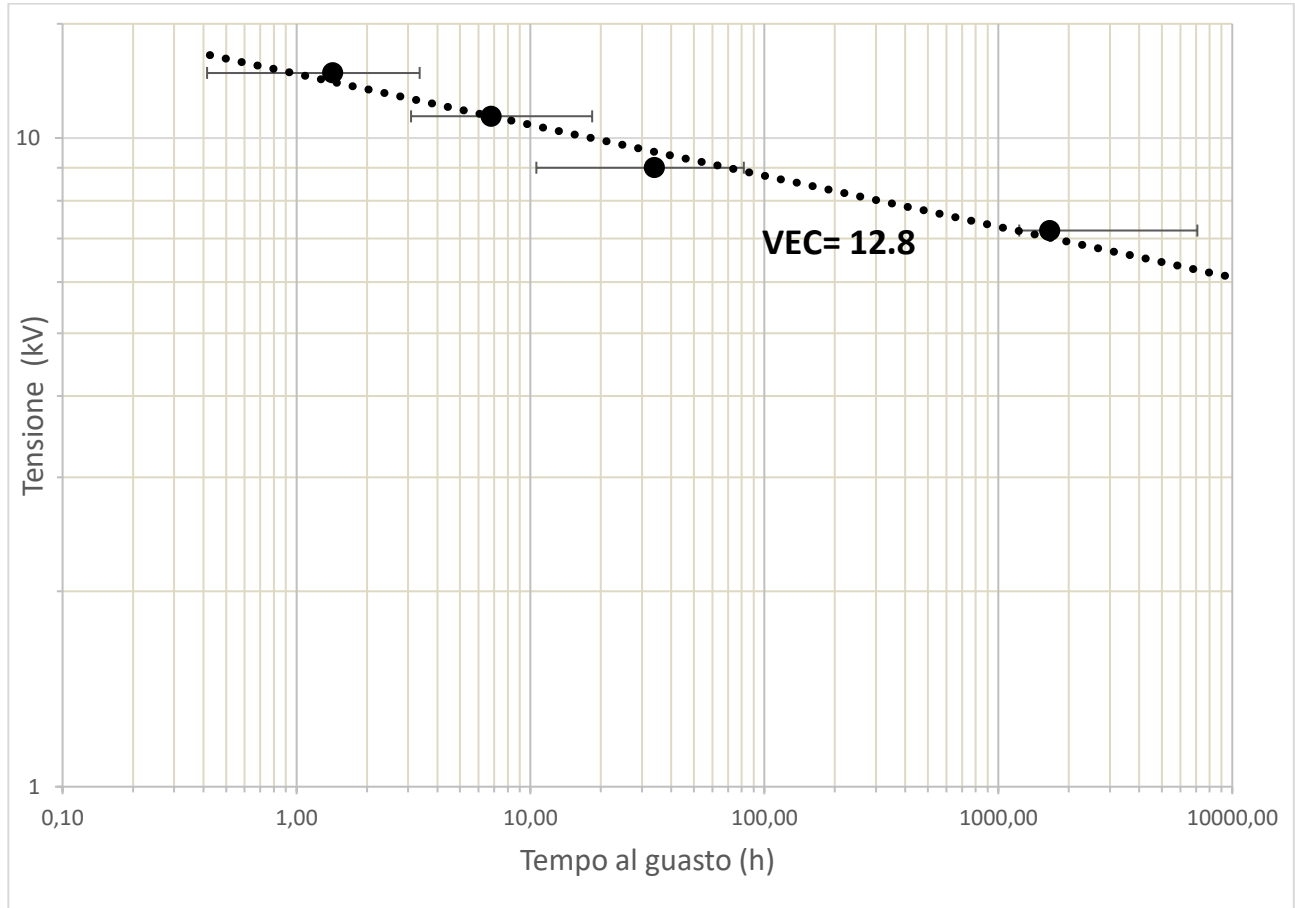


Fig. 3.5: Caratteristica della curva di vita in DC.

$$t_F = L_0 V^{-n} \quad (3.2)$$

dove t_F = tempo al guasto, V è la tensione applicata e L_0 e n sono parametri del modello ricavati dalla regressione lineare.

Il parametro n , che rappresenta l'inverso del coefficiente angolare della retta di vita di Fig.3.5, per la sua importanza viene chiamato *Voltage Endurance Coefficient* (VEC) [10]. Quanto più alto è il VEC tanto migliore sarà la resistenza nel tempo del materiale isolante alla sollecitazione elettrica (endurance), cioè a parità di campo elettrico il materiale durerà più a lungo.

Dai risultati riportati in Fig. 3.5 si ottengono $L_0 = 1.16 \times 10^{14}$ h e $n = 12.8$.

Estrapolando i risultati alla tensione di servizio di 0.9 kV si ottiene una vita $t_F = 2 \times 10^{14}$ h, che rappresenta una durata praticamente infinita, segno dell'elevata affidabilità del sistema isolante del condensatore progettato.

4 CARATTERIZZAZIONE CON RIPPLE SUPERIMPOSTO

4.1 CONSIDERAZIONI PRELIMINARI

Dopo aver caratterizzato il materiale isolante sottoposto alla sola componente continua si vuole verificare l'eventuale riduzione di vita dovuta all'introduzione della componente di ripple. Innanzitutto, per semplificare la trattazione, dal momento che nessun tipo di ricerca è stata effettuata in merito, si è scelto di utilizzare un segnale di ripple puramente sinusoidale.

Successivamente si è reso necessario valutare se condurre le prove a parità di valore di campo elettrico applicato al provino oppure a parità di componente continua applicata. Considerando che in ambito pratico è solitamente di interesse il valore della componente continua, e che i sistemi di regolazione degli apparati di conversione statica valutano che la componente continua della tensione sia mantenuta costante ad un valore prefissato, si è optato per la seconda strategia.

Un altro aspetto oggetto di valutazione è legato all'intensità di tale ripple. Sempre considerando un punto di vista applicativo si è stimato che tali oscillazioni siano solitamente contenute entro un massimo del 10% della componente continua. Infine, si è considerato l'aspetto della frequenza della componente di ripple, non solo come valore tipico per le applicazioni HVDC ma anche come variabile di interesse per lo svolgimento delle prove. Si è scelto quindi di effettuare prove a due diversi valore di frequenza, 100 Hz e 1000 Hz, valori abbastanza rappresentativi di eventuali oscillazioni nella tensione DC generati da elettronica di potenza.

4.2 CARATTERIZZAZIONE CON RIPPLE SUPERIMPOSTO: FREQUENZA 100 HZ

Sono state eseguite prove di vita al 70%, 50% e 40% della TS in DC con ripple superimposto pari al 10% della tensione DC applicata alla frequenza di 100 Hz.

Per ogni prova si riporta il grafico dei valori sperimentali in carta di Weibull, con la retta di regressione e gli intervalli di confidenza inferiore e superiore della regressione; nella tabella si riportano i valori di α e β calcolati dalla regressione, insieme ai rispettivi intervalli di confidenza al 90% e il coefficiente di correlazione R. In particolare, nella Fig. 4.2.1 e tab 4.2.1 sono riportati i risultati delle prove al 70%TS, nella Fig. 4.2.2 e tab. 4.2.2 i risultati delle prove al 50%TS, nella Fig. 4.2.3 e tab. 4.2.3 i risultati delle prove al 40%TS.

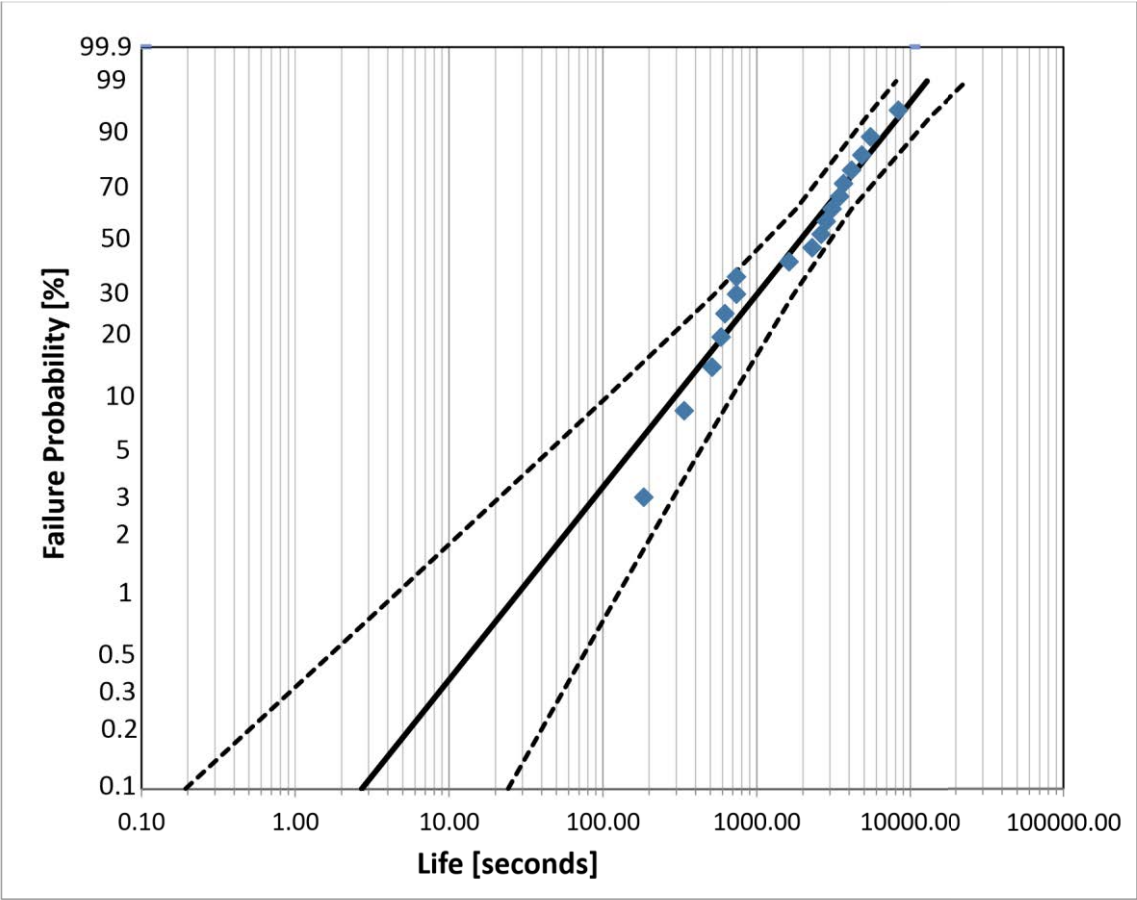


Fig. 4.2.1: Distribuzione di Weibull dei tempi al guasto DC 70% + AC @100Hz.

Tab. 4.2.1: Parametri statistici della distribuzione in carta di Weibull.

WEIBULL		Intervalli di Confidenza	
		Inf (90%)	Sup (90%)
β	1.00	0.73	1.42
α [s]	2775	1797	4118
R	0.98		

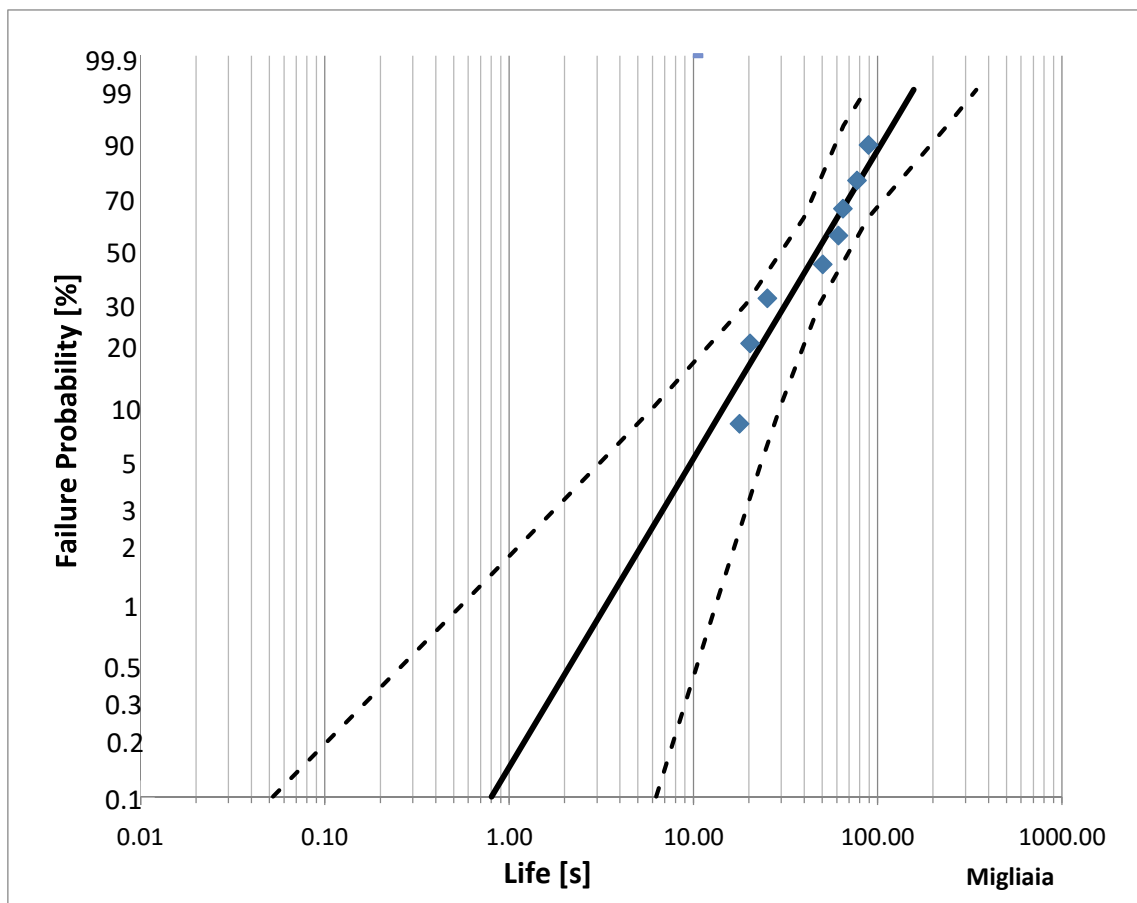


Fig. 4.2.2: Distribuzione di Weibull dei tempi al guasto DC 50% + AC @100Hz.

Tab. 4.2.2: Parametri statistici della distribuzione in carta di Weibull.

WEIBULL		Intervalli di Confidenza	
		Inf (90%)	Sup (90%)
β	1.60	0.97	3.17
α [s]	60452	39712	88964
R	0.94		

Si fa osservare che i tempi di vita per i provini al 40%TS +AC sono risultati molto lunghi (Fig. 4.2.3), pertanto, come consigliato anche dalle norme, 6 provini sono stati censurati dopo 500h. Ovviamente, l'elaborazione di questi dati con le tecniche del censuramento progressivo hanno fornito risultati non molto accurati data la poca numerosità dei campioni (solo 5 campioni scaricati). Questo fa sì che l'intervallo di confidenza sia piuttosto ampio.

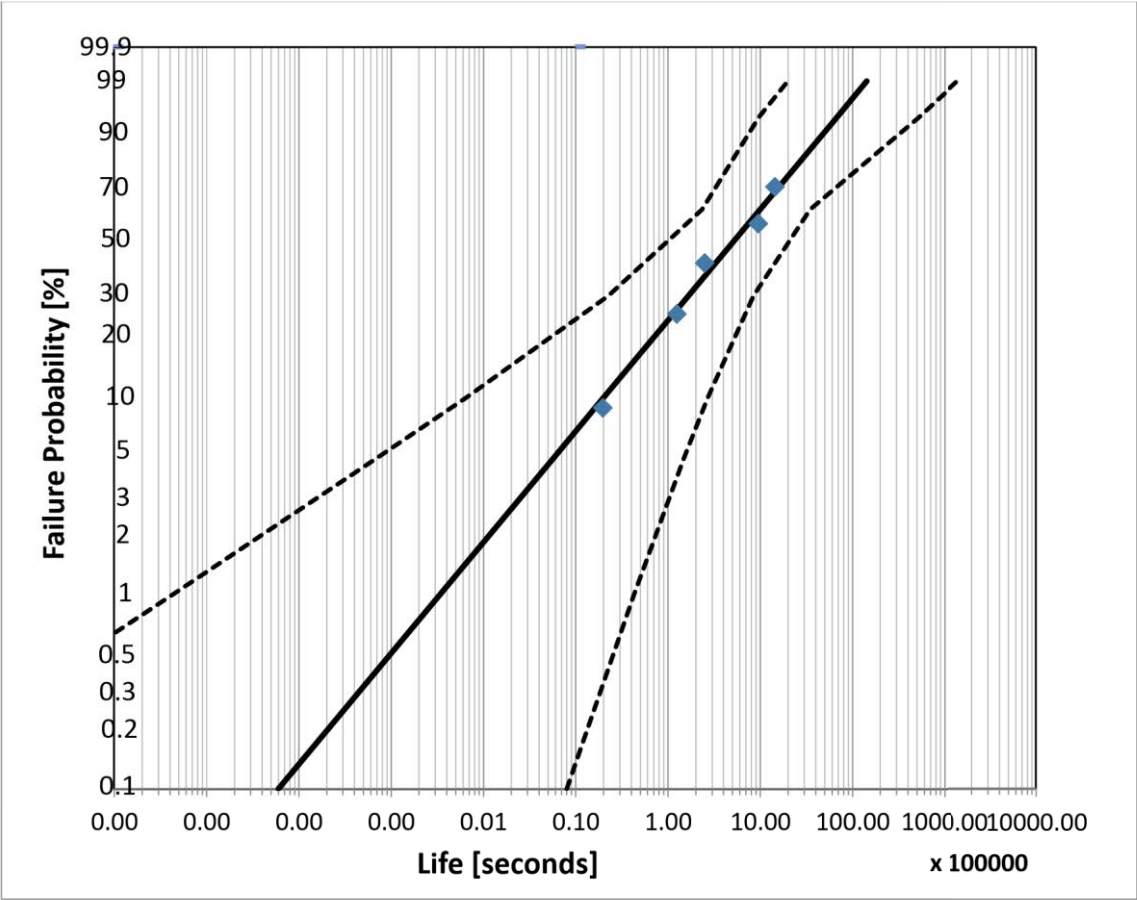


Fig. 4.2.3: Distribuzione di Weibull dei tempi al guasto DC 40% + AC @100Hz.

Tab. 4.2.3: Parametri statistici della distribuzione in carta di Weibull.

WEIBULL		Intervalli di Confidenza	
		Inf (90%)	Sup (90%)
β	0.57	0.31	1.44
α [s]	1000430	233293	3481663
R	0.99		

La Fig. 4.2.4 riporta i risultati sperimentali delle prove di vita in DC+AC @100Hz: vengono indicati i punti sperimentali, i parametri α della Weibull, con i rispettivi intervalli di confidenza e la retta di regressione che in coordinate bilogaritmiche rappresenta il modello a potenza inversa riportato nell’equazione 3.2.

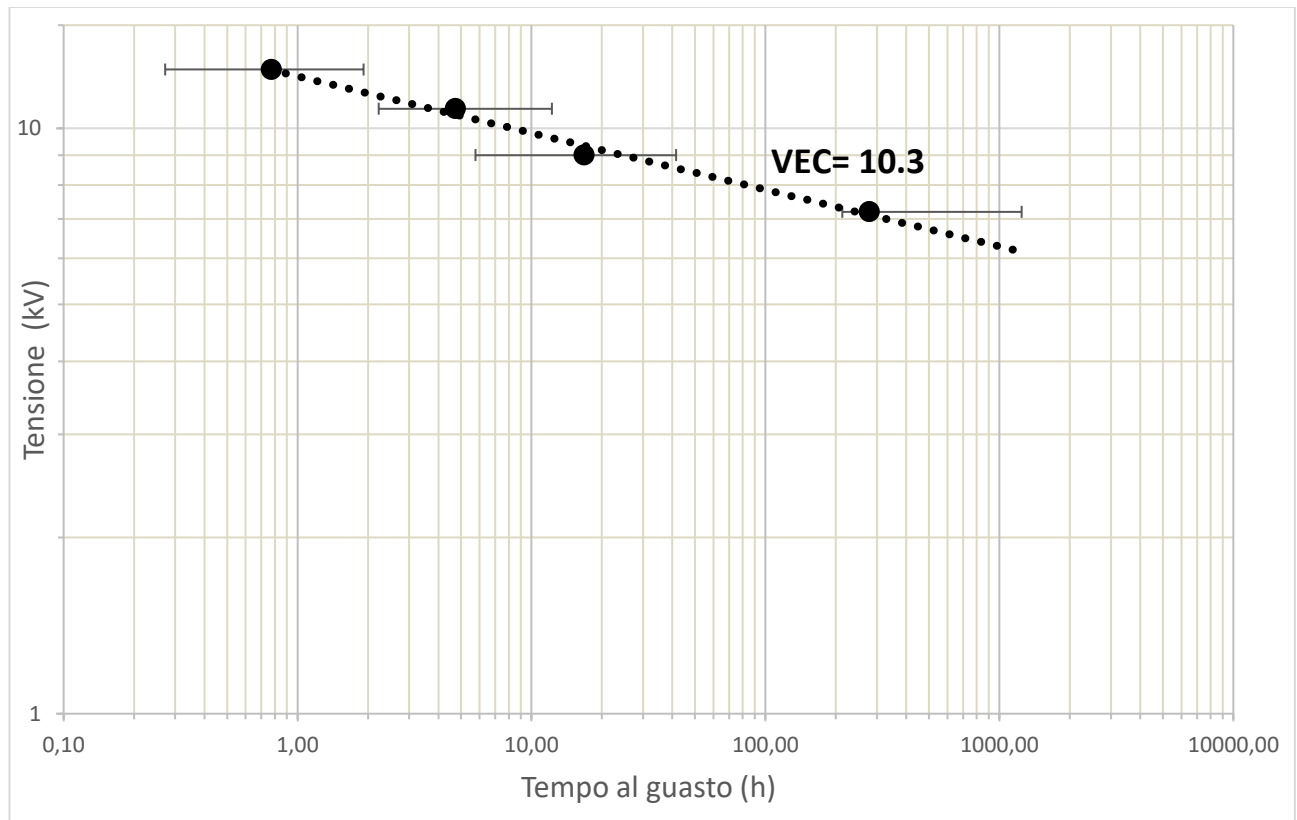


Fig. 4.2.4: Curva di vita in DC + AC @100 Hz.

I parametri del modello di vita di eq. 3.2 sono $L_0 = 1.64 \times 10^{11}$ h e $n = 10.3$. Si può osservare che il VEC, 10.3, in questo caso è minore di quello calcolato con la sola componente DC, 12.8, segno che il ripple ha ridotto l'endurance del materiale. Infatti, estrapolando i risultati alla tensione di servizio di 0.9 kV DC si ottiene una vita $t_f = 1.9 \times 10^{11}$ h, che rappresenta ancora una durata molto lunga, ma inferiore di 3 ordini di grandezza rispetto al caso della sola componente DC.

4.3 CARATTERIZZAZIONE CON RIPPLE SUPERIMPOSTO: FREQUENZA 1000 HZ

Sono state eseguite prove di vita al 70%, 60%, 50% e 40% della TS in DC con ripple superimposto pari al 10% della tensione DC applicata alla frequenza di 1000 Hz.

Per ogni prova si riporta il grafico dei valori sperimentali in carta di Weibull, con la retta di regressione e gli intervalli di confidenza inferiore e superiore della regressione; nella tabella si riportano i valori di α e β calcolati dalla regressione, insieme ai rispettivi intervalli di confidenza al 90% e il coefficiente di correlazione R. In particolare, nella Fig. 4.3.1 e tab. 4.3.1 sono riportati i risultati delle prove al 70%TS, nella Fig. 4.3.2 e tab. 4.3.2 i risultati delle prove al 60%TS, nella Fig. 4.3.3 e tab. 4.3.3 i risultati delle prove al 50%TS e nella Fig. 4.3.4 e tab. 4.3.4 i risultati delle prove al 40%TS.

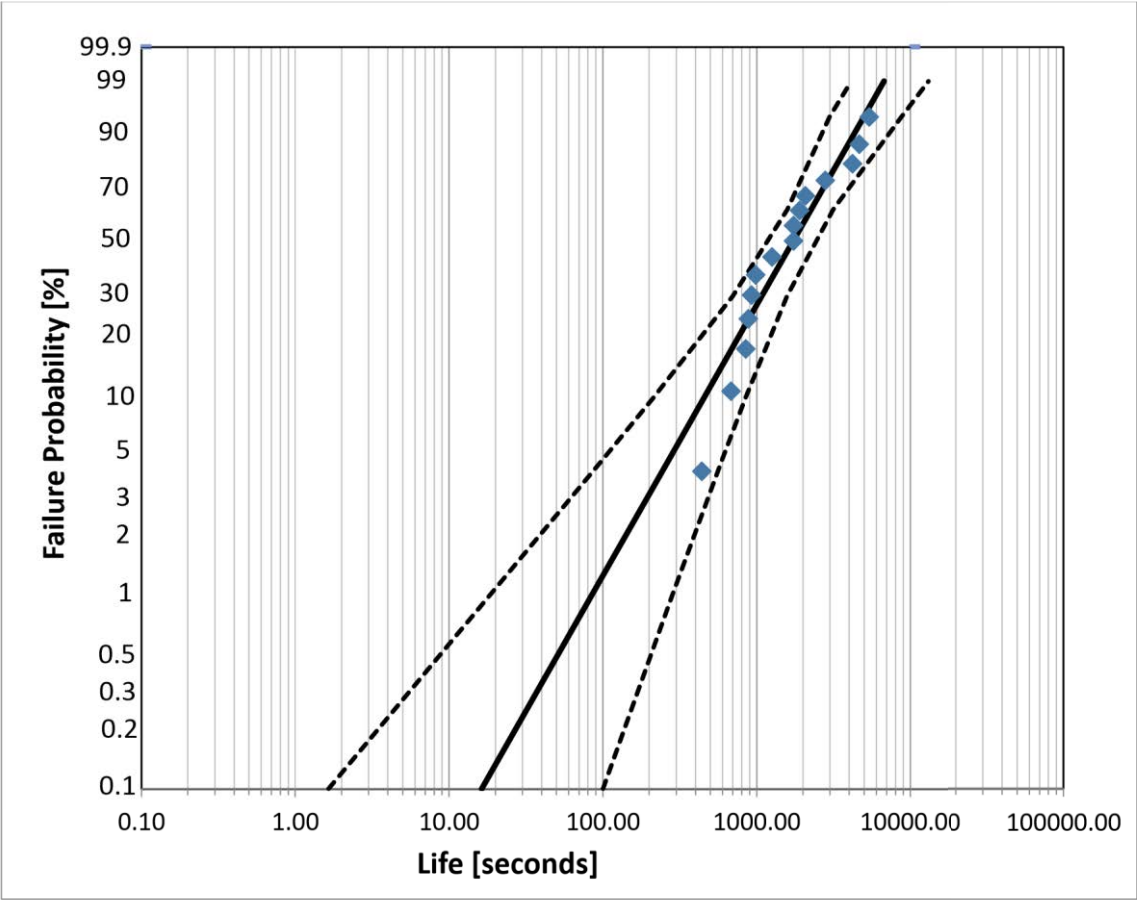


Fig. 4.3.1: Distribuzione di Weibull dei tempi al guasto DC 70% + AC @1000Hz.

Tab. 4.3.1: Parametri statistici della distribuzione in carta di Weibull.

WEIBULL		Intervalli di confidenza	
		Inf (90%)	Sup (90%)
β	1.40	0.95	2.25
α [s]	2261	1585	3155
R	0.96		

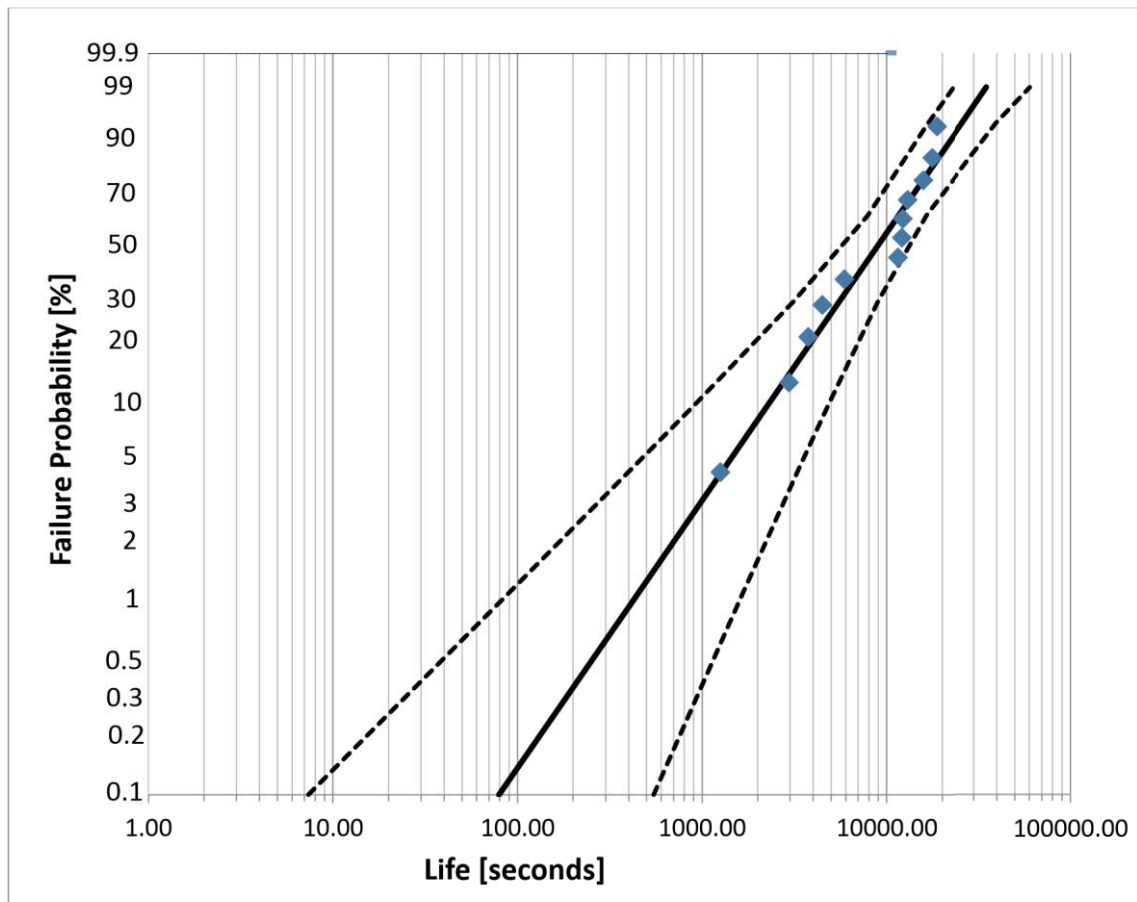


Fig. 4.3.2: Distribuzione di Weibull dei tempi al guasto DC 60% + AC @1000Hz.

Tab. 4.3.2: Parametri statistici della distribuzione in carta di Weibull.

WEIBULL		Intervalli di confidenza	
		Inf (90%)	Sup (90%)
β	1.38	0.95	2.19
α [s]	11650	7899	16404
R	0.98		

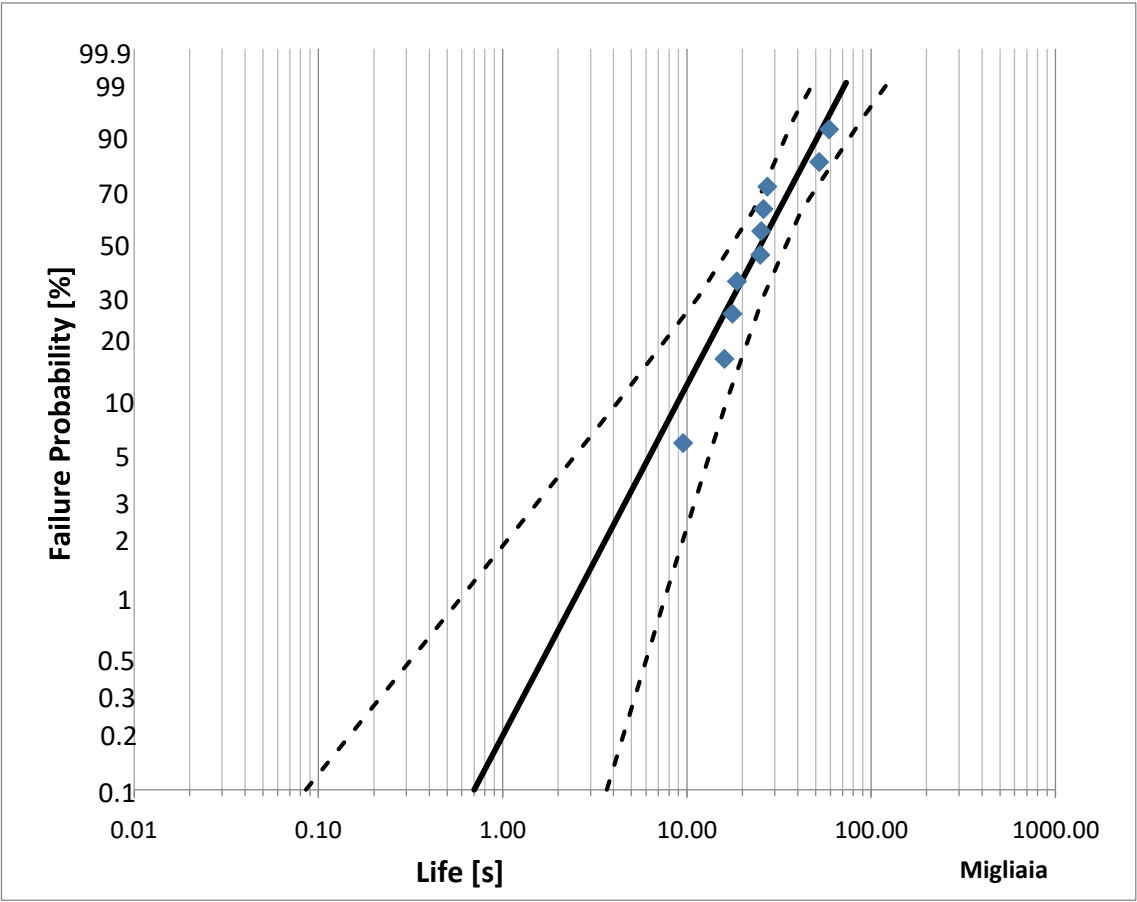


Fig. 4.3.3: Distribuzione di Weibull dei tempi al guasto DC 50% + AC @1000Hz.

Tab. 4.3.3: Parametri statistici della distribuzione in carta di Weibull.

WEIBULL		Intervalli di Confidenza	
		Inf (90%)	Sup (90%)
β	1.81	1.17	3.19
α [s]	31502	22927	41761
R	0.95		

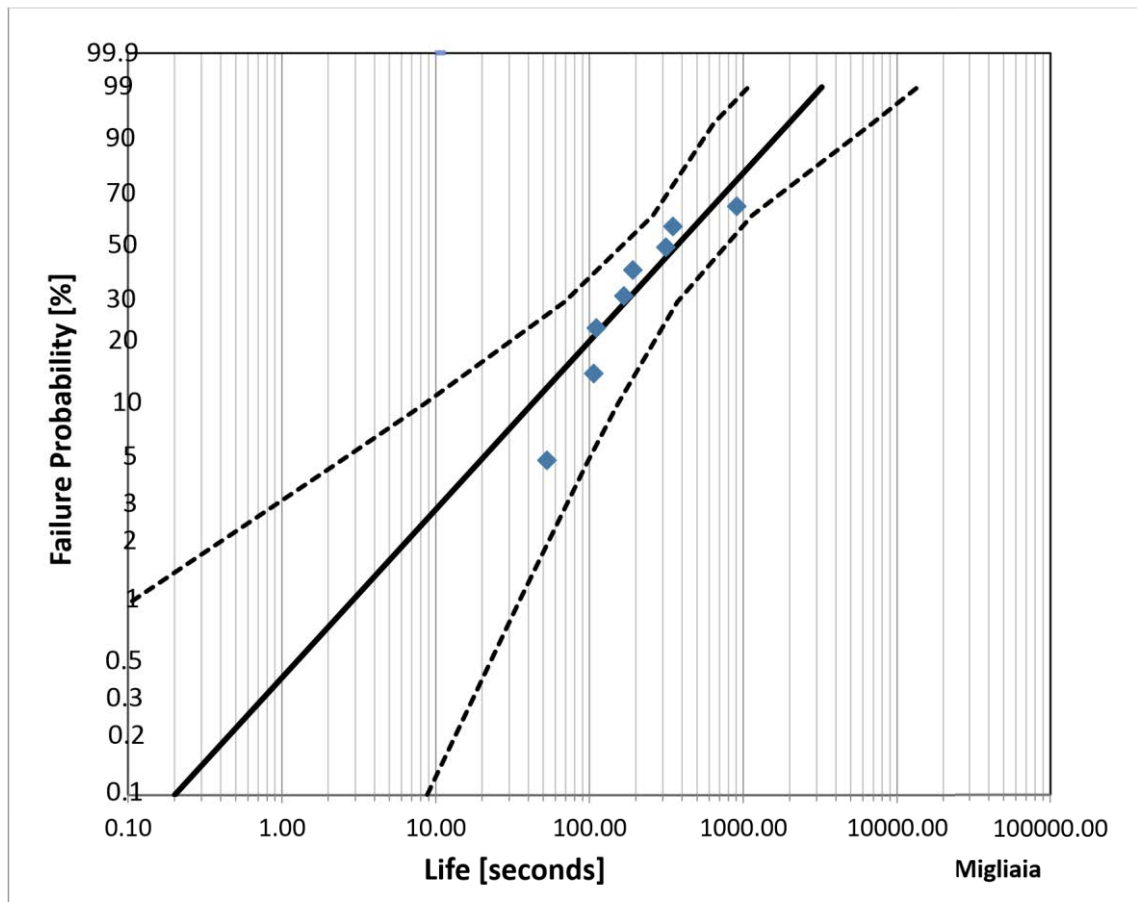


Fig. 4.3.4: Distribuzione di Weibull dei tempi al guasto DC 40% + AC @1000Hz.

Tab. 4.3.4: Parametri statistici della distribuzione in carta di Weibull.

WEIBULL		Intervalli di Confidenza	
		Inf (90%)	Sup (90%)
β	0.87	0.53	1.73
α [s]	560358	259213	1138478
R	0.93		

Si fa osservare che i tempi di vita per i provini al 40%TS +AC sono risultati molto lunghi (Fig. 4.3.4), pertanto, come consigliato anche dalle norme, 4 provini sono stati censurati dopo 500h. Ovviamente, l'elaborazione di questi dati con le tecniche del censuramento progressivo hanno comunque fornito risultati accettabili visto che il numero di provini scaricati, 8, è stato sufficientemente ampio.

Nella figura 4.3.5 è rappresentata la curva di vita in regime DC+AC con la componente alternata di ampiezza pari al 10% della componente continua e alla frequenza di 1000 Hz.

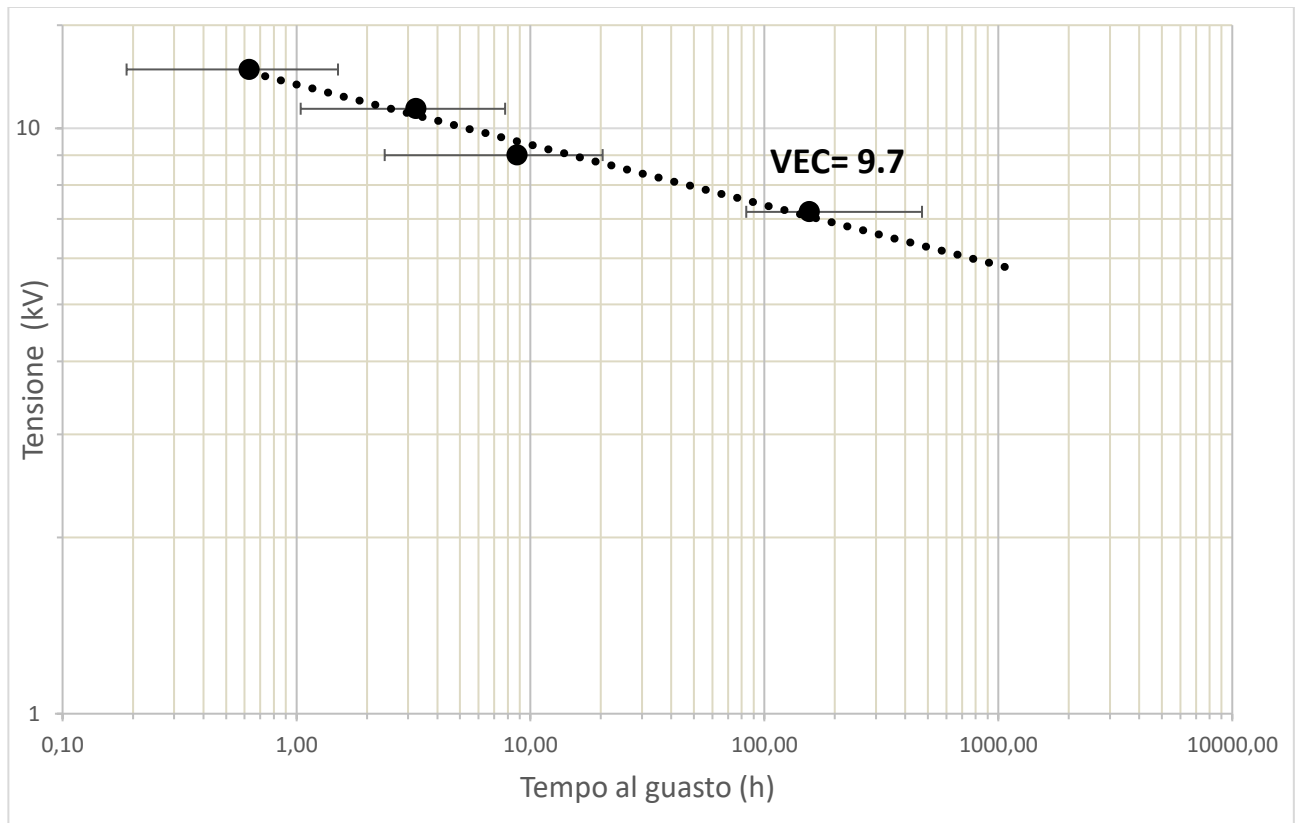


Fig. 4.3.5: Curva di vita in DC + AC @1000 Hz.

I parametri del modello di vita di eq. 3.2 sono $L_0 = 2.74 \times 10^{10}$ h e $n = 9.7$. Si può osservare che il VEC, 9.7, risulta minore di quello calcolato con la sola componente DC, 12.8, e di quello con tensione DC+AC a 100Hz. Estrapolando i risultati alla tensione di servizio di 0.9 kV DC si ottiene una vita $t_F = 2.0 \times 10^{10}$ h, durata di vita ancora molto lunga, ma comunque ridotta di 4 ordini di grandezza rispetto al caso della sola componente DC.

4.4 DISCUSSIONE SULLE PROVE DI VITA

Per un più agevole confronto tra le tre differenti sollecitazioni applicate al dielettrico si riportano tutte e tre le curve di vita nel medesimo grafico (Fig. 4.4.1). Si possono fare le seguenti osservazioni:

- Con la sola componente DC applicata, le vite sono in generale molto lunghe, in particolare per valori di tensione vicini a quelli di servizio, dal momento che il VEC è molto elevato (12.8).
- Se alla tensione DC viene contemporaneamente sovrapposta una componente di ripple AC a 100 Hz pari al 10% della componente DC stessa, la vita del dielettrico si riduce significativamente. Si noti che il VEC passa da 12.8 a 10.3.
- Incrementando la frequenza dal ripple AC, mantenendo costanti i valori delle componenti, la vita si riduce ulteriormente e il VEC diventa 9.7. Si fa osservare che un valore di VEC basso comporta vite estrapolate alla tensione di servizio molto inferiori.

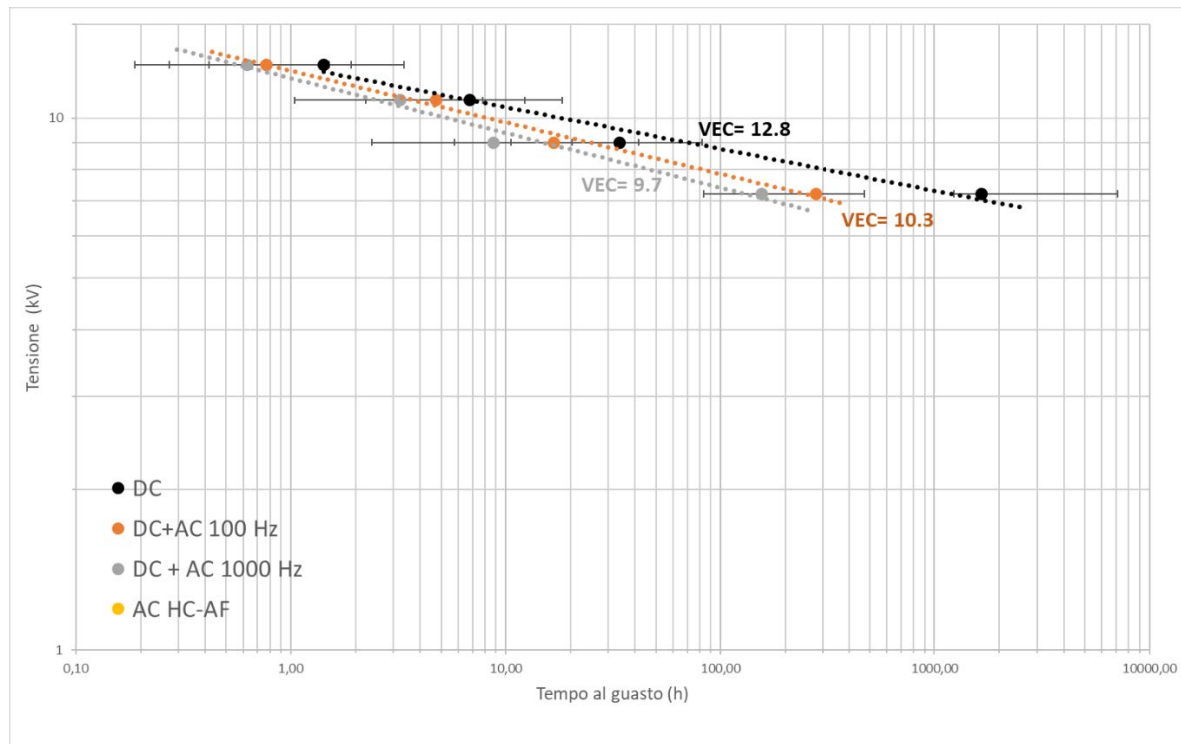


Fig. 4.4.1: Curve di vita in DC, DC+AC @100Hz e DC+AC @1000 Hz.

È possibile trarre quindi una prima conclusione preliminare, ovvero che mantenendo costante l'intensità del ripple (in valore percentuale) rispetto al valore della componente continua la durata della vita decresce all'aumentare della frequenza fondamentale della distorsione. Questo effetto può essere spiegato dall'invecchiamento elettromeccanico indotto dalla AC: la componente continua rappresenta uno stress costante che genera una reazione costante del materiale, una volta raggiunto il valore di regime. La componente di ripple invece genera una fatica elettrica, poiché perturba lo stato di equilibrio elettromeccanico trovato dal materiale con la componente DC. L'influenza della piccola oscillazione, in generale, è minima confrontata con lo stato tensionale costante, tuttavia, se la frequenza con cui si ripete l'oscillazione cresce è possibile che l'effetto complessivo della risposta del materiale, e quindi della vita elettrica, sia paragonabile ad uno stato tensionale di intensità maggiore. La conseguenza si traduce in una riduzione della vita. Oltre all'ampiezza, quindi, la frequenza del ripple, sarà un parametro che andrà considerato durante l'elaborazione del modello matematico, oggetto dei prossimi capitoli.

5 Il concetto del Tasso di Invecchiamento (Aging rate)

Il fenomeno dell'invecchiamento è definito come un cambiamento irreversibile delle proprietà dei materiali o dei sistemi. L'invecchiamento procede nel tempo con una velocità (o tasso, rate) che dipende dall'ampiezza delle sollecitazioni applicate e può essere valutato in qualunque istante mediante la misura delle proprietà fondamentali del sistema e il loro confronto con i valori iniziali.

Se definiamo la variabile A come invecchiamento (globale o cumulativo), S una generica sollecitazione, t il tempo e $p = P/P_0$ una proprietà correlata al guasto, possiamo scrivere la relazione generale [10]:

$$A = f(p) = \int_0^t R(S) dt \Leftrightarrow A = R(S) t \quad (5.1)$$

dove R (che è anche esprimibile come $\frac{dA}{dt}$) è la velocità (o tasso, rate) di invecchiamento. Esso dipende dalla sollecitazione e non dal tempo.

Quando il valore della proprietà p scende al valore limite, p_L , avviene il guasto, e il tempo diviene la durata di vita L .

Sotto quest'ipotesi è possibile esprimere il valore massimo della funzione invecchiamento (A_L):

$$A_L = f(p_L) = \int_0^L R(S) dt \Leftrightarrow A_L = R(S) L \quad (5.2)$$

L'equazione (6.2) viene detta equazione generale di vita.

Per i materiali isolanti, come sappiamo, la sollecitazione principale è costituita dal gradiente elettrico, E , e la proprietà più importante è la rigidità dielettrica, RD . In questo caso, le equazioni (6.1) e (6.2) possono essere così riscritte:

$$A = f\left(\frac{RD}{RD_0}\right) = R(E) t \quad (5.3)$$

$$A_L = f(0) = R(E) L \quad (5.4)$$

$$L = A_L / R(E) \quad (5.5)$$

Nel caso in cui si abbiano sollecitazioni multiple (S e S'), in analogia con le equazioni (5.3) e (5.4) possiamo scrivere che:

$$A = f(p) = R(S, S') t \quad (5.5)$$

$$A_L = f(p_L) = R(S, S') L \quad (5.6)$$

L'equazione della vita, quindi, risulterà anch'essa funzione di entrambe le sollecitazioni:

$$L = F(S, S') \quad (5.7)$$

Dalle relazioni viste finora appare chiaro che la vita del materiale è legata al tasso di invecchiamento: Ageing Rate, AR).

La formalizzazione dell'AR per sollecitazioni multiple rappresenta il fattore chiave, dato che con la sola componente DC si avrà a che fare inizialmente con una sollecitazione singola (E_{dc}) per poi applicare una sollecitazione AC+DC combinata ($E_{dc} + \Delta E$).

Nella definizione del modello di vita per la sollecitazione combinata andremo a vedere in particolare come influisce la componente alternata rispetto alla condizione della sola componente continua.

5.1 Determinazione del tasso di invecchiamento in sola Corrente Continua

In letteratura il modello di vita maggiormente applicato è il modello IPM (*Inverse Power Model*), già utilizzato nei capitoli 3 e 4 (eq. 3.2) per interpolare i risultati sperimentali. Si cerca, quindi, di esprimere il tasso di invecchiamento, sfruttando il modello IPM nel caso in cui vi sia solamente la componente continua come sollecitazione.

$$R(E_s) = R_0 E_{dc}^n \quad (5.8)$$

dove R_0 è una costante, propria del materiale indipendente dalla sollecitazione, ma che può dipendere ad esempio dalla temperatura e n è il VEC del materiale. Si noti che R è costante se la sollecitazione non varia nel tempo.

La relazione per la stima della vita risulterebbe quindi:

$$L_{dc} = \frac{K}{R_0 E_{dc}^n} \quad (5.9)$$

La relazione (5.9) consente quindi di stimare la vita di un provino sottoposto ad una data sollecitazione a patto che essa sia singola. Nel caso in cui si avesse una sollecitazione combinata dovuta all'introduzione di componente AC superimposta alla componente DC, occorre quindi esprimere il tasso di invecchiamento legato alla combinazione delle due.

5.2 Determinazione del tasso di invecchiamento in regime DC+AC

Per determinare matematicamente il Se si procede come al paragrafo precedente, occorre introdurre un termine aggiuntivo che esprima l'entità dell'oscillazione.

Si può, quindi, scrivere:

$$R(E_{dc+ac}) = R_0 (E_{dc} + \Delta E)^n \quad (5.10)$$

dove E_{dc} rappresenta la componente continua mentre ΔE rappresenta il valore efficace della componente di ripple.

Dalla relazione (5.10) è possibile raccogliere il termine E_{dc} ottenendo così la relazione:

$$R(E_{dc+ac}) = R_0 E_{dc}^n \left(1 + \frac{\Delta E}{E_{dc}}\right)^n \quad (5.11)$$

Con questi passaggi è possibile mettere in evidenza il rapporto $\frac{\Delta E}{E_{dc}}$ che rappresenta il rapporto tra l'ampiezza della componente AC e la componente DC. Durante lo svolgimento delle prove di vita si è utilizzato prevalentemente un rapporto fisso tra queste due quantità. Nello specifico si è posta un'ampiezza della componente AC pari al 10% della componente DC.

Ricordando lo sviluppo in serie di Taylor applicato alle funzioni esponenziali, posto che la variabile in oggetto (x) sia inferiore a 1 è possibile scrivere che:

$$(1+x)^k = 1 + kx + \frac{k(k-1)}{2}x^2 + \frac{k(k-1)(k-2)}{6}x^3 + \dots + \dots \binom{k}{n}x^n + o(x^n) \quad (5.12)$$

Effettuando una parametrizzazione in cui si ponga il termine $\frac{\Delta E}{E_{dc}}$ pari alla variabile x e, considerando che per le ipotesi effettuate esso risulta molto inferiore a 1, (nel caso delle prove di vita effettuate vale 0.1), è possibile applicare lo sviluppo in serie di Taylor e il termine tra parentesi assume quindi la seguente forma:

$$(1+x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)}{2}x^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{6}x^3 + \dots \quad (5.13)$$

Il coefficiente n dalla formula (5.10) di partenza rappresenta il VEC, che, è noto dalle caratterizzazioni svolte nei capitoli precedenti. In prima approssimazione si possono trascurare i termini di ordine superiore al primo perché molto piccoli, si ha quindi:

$$\left(1 + \frac{\Delta E}{E_{dc}}\right)^n \cong \left(1 + n \frac{\Delta E}{E_{dc}}\right) \quad (5.14)$$

Di conseguenza è possibile scrivere una nuova relazione per il tasso di invecchiamento:

$$R(E_{dc+ac}) = R_0 E_{dc}^n \left(1 + n \frac{\Delta E}{E_{dc}}\right) \quad (5.15)$$

A questo punto si può fare un ulteriore passo in avanti introducendo un ulteriore fattore che tenga in considerazione l'influenza della frequenza sulla vita dei campioni. Per simulare questo comportamento si è introdotto un termine aggiuntivo avente la seguente forma $\left(\frac{f}{f_0}\right)^x$, dove f_0 rappresenta una frequenza di riferimento e x una costante di adattamento, ottenibile dai risultati sperimentali.

L'aumento della frequenza, come si è visto nella Sezione 5, rappresenta un fattore che determina un accorciamento della vita elettrica, quindi, complessivamente questo termine dovrà essere > 1 .

Questo termine in frequenza dovrà essere inserito nella relazione (5.10) come termine moltiplicativo della componente alternata, facendo sì che quindi il modello assuma la seguente forma:

$$R(E_{dc+ac}) = R_0 \left[E_{dc} + \left(\frac{f}{f_0}\right)^x \Delta E \right]^n \quad (5.16)$$

A questo punto, come in precedenza si raccoglie il termine $\frac{\Delta E}{E_{dc}}$, ottenendo quindi:

$$R(E_{dc+ac}) = R_0 E_{dc}^n \left[1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^x \frac{\Delta E}{E_{dc}} \right]^n \quad (5.17)$$

Occorre ripetere nuovamente lo sviluppo in serie di Taylor visto in precedenza con il troncamento al termine di ordine I. Tuttavia, ora si ha a che fare con un termine aggiuntivo. Per far sì che lo sviluppo in serie di Taylor sia comunque applicabile occorre che il termine $\left(\frac{f}{f_0}\right)^x \frac{\Delta E}{E_{dc}}$ sia inferiore a 1.

Il termine $\left(\frac{f}{f_0}\right)^x$ risulta essere maggiore di uno, tuttavia, se $x < 1$ considerando che il termine $\frac{\Delta E}{E_{dc}} \ll 1$, si ha che complessivamente il termine $\left(\frac{f}{f_0}\right)^x \frac{\Delta E}{E_{dc}}$ risulta essere inferiore a 1 per un range di frequenze molto ampio.

Sulla base di quanto detto finora, per valori opportuni di $x < 1$, è quindi possibile applicare anche in questo caso lo sviluppo in serie di Taylor troncato al primo ordine alla relazione (5.17). Con queste ipotesi la otteniamo l'equazione:

$$R(E_{dc+ac}) = R_0 E_{dc}^n \left[1 + n \left(\frac{f}{f_0} \right)^x \frac{\Delta E}{E_{dc}} \right] \quad (5.18)$$

A questo punto si può scrivere la relazione per la stima della vita di un provino sottoposto a sollecitazione multipla del tipo DC con ripple AC superimposto:

$$L_{ac+dc} = \frac{K}{R_0 E_{dc}^n \left[1 + n \left(\frac{f}{f_0} \right)^x \frac{\Delta E}{E_{dc}} \right]} \quad (5.19)$$

Richiamando la relazione (5.9) per la stima della vita in sola DC e facendone il rapporto con (5.19) si ottiene:

$$\frac{L_{ac+dc}}{L_{dc}} = \frac{K}{R_0 E_{dc}^n \left[1 + n \left(\frac{f}{f_0} \right)^x \frac{\Delta E}{E_{dc}} \right]} * \frac{R_0 E_{dc}^n}{K} \quad (5.20)$$

Dopo alcune opportune semplificazioni si giunge alla seguente equazione:

$$\frac{L_{ac+dc}}{L_{dc}} = \frac{1}{\left[1 + n \left(\frac{f}{f_0} \right)^x \frac{\Delta E}{E_{dc}} \right]} \quad (5.21)$$

La relazione (5.21) esprime il rapporto della vita nelle due condizioni di sollecitazione.

Si può osservare che, nota che la vita del provino sottoposto a sollecitazione DC singola e l'esponente del termine moltiplicativo delle frequenze, calcolando il termine $\left[1 + n \left(\frac{f}{f_0} \right)^x \frac{\Delta E}{E_{dc}} \right]$ è possibile stimare la vita del provino sottoposto a sollecitazione combinata.

Dalla eq. 5.21 si può ottenere, quindi, la relazione finale del modello di vita AC+DC:

$$L_{ac+dc} = \frac{L_{dc}}{1 + n \left(\frac{f}{f_0} \right)^x \frac{\Delta E}{E_{dc}}} \quad (5.22)$$

5.3 Verifica modello matematico con i risultati sperimentali

In questo paragrafo verrà illustrato come il modello matematico si adatta ai dati sperimentali.

Per prima cosa occorre definire i valori dei coefficienti che compaiono nel modello di equazione 5.22. Tali valori sono riportati in Tab. 5.3.1.

Tab. 5.3.1: Valori utilizzati per i parametri del modello.

Legenda parametri utilizzati	Valore utilizzato
L_{dc} = Vita in sola continua	Valori di Tab. 3.5
n = VEC	12.8
ΔE = Ampiezza della componente alternata	$\Delta E/E_{dc} = 0.1$
E_{dc} = Ampiezza della componente continua	
f = Frequenza di prova	100, 1000 Hz
f_0 = Frequenza di riferimento	50 Hz
x =coeff. di adattamento	0.4

Si noti, in particolare, che si è utilizzato un valore di VEC pari a 12.8 che corrisponde al valore che si ottiene con la sola sollecitazione in DC. Poiché si è visto che il VEC diminuisce all'aumentare della frequenza del ripple AC, tale ipotesi rappresenta, un'approssimazione abbastanza forte, ma che semplifica notevolmente il numero di parametri del modello e che pertanto può essere perseguita come primo approccio. Il valore $x=0.4$ è stato ottenuto da una stima ai minimi quadrati per adattare il modello ai risultati sperimentali.

Nella Tab. 5.3.2 si mostra il confronto tra i risultati sperimentali e i valori di vita calcolati dal modello per le tre tipologie di sollecitazione, (DC, DC + 10%AC a 100Hz, DC + 10%AC a 1000 Hz) e per i differenti valori di tensione DC applicata.

Tab. 5.3.2: Confronto tempi al guasto misurati sperimentalmente e stimati dal modello.

V_{dc} (kV)	Vita [h]								
	Sola DC			10% AC - 100Hz			10% AC - 1000Hz		
	Mis	Mod	Err%	Misurato	Modello	Err %	Misurato	Modello	Err %
12.6	1.4	1.4	0	0.77	0.61	-21	0.63	0.43	-31.7
10.8	6.8	6.8	0	4.2	3.2	-24	3.2	2.1	-34.4
9	33.9	33.9	0	16.8	13.7	-18	8.7	7.2	-17.2
7.2	750	750	0	278	304	9.3	155	160	3.2

Confrontando i dati riportati in Tab. 5.3.2 si può osservare un buon adattamento dei valori di vita misurati sperimentalmente (Mis) ai risultati stimati dal modello 5.22 (Mod). Infatti, gli errori percentuali sono assolutamente accettabili per stime di questo tipo. In particolare, si osserva che il modello sottostima la vita a valori di tensione dc più elevati, questo probabilmente a causa delle approssimazioni introdotte. Tuttavia, al diminuire della tensione applicata l'errore cala significativamente e scende al di sotto del 10% per la tensione inferiore di 7.2 kV. Dal momento che l'interesse è per valori di tensione vicini a quelle di servizio, cioè tra 0.9 e 1.5 kV, si può ritenere che la stima fornita dal modello sia sufficientemente accurata.

Si sottolinea che il parametro x non presenta al momento un vero e proprio significato fisico. Tale parametro è, infatti, stato calcolato in modo da minimizzare l'errore sulla stima dei valori di vita alle varie frequenze, pertanto, deve essere calcolato sulla base di risultati di prove di vita sperimentali.

6 Conclusioni

In conclusione, dalle prove di vita effettuate su film per condensatori in PP, simile a quello utilizzato nel prototipo di tamponamento ENEA, si può evidenziare quanto segue:

- In continua il film ha un ottimo coefficiente di *voltage endurance* e mostra una durata praticamente infinita ai 900V di sollecitazione elettrica di servizio. Si noti però che le prove di vita sono state effettuate alla temperatura di 20°C, mentre in servizio la temperatura potrebbe essere più elevata, raggiungendo anche 50-60 °C. Questo renderà la vita di servizio "finita" ma comunque sicuramente maggiore dei 40 anni richiesti per tale applicazione (circa 350000 ore).
- La presenza di una componente AC riduce la vita del film per condensatore, in particolare ad elevate frequenze di ripple. Tuttavia, il valore assoluto della vita rimane ampiamente al di sopra dei valori richiesti. Si deve osservare che la presenza di una componente AC contribuirà anche ad aumentare la temperatura del condensatore a causa delle perdite dielettriche che crescono proporzionalmente alla frequenza. Se le temperature non superano i 60°C, però, la vita dovrebbe comunque essere abbondantemente superiore ai 40 anni richiesti. Se si superassero i 60°C, tuttavia, l'ossidazione del film potrebbe diventare un fattore di invecchiamento importante che potrebbe causare problemi all'affidabilità del sistema isolante. Si consiglia pertanto di installare nel condensatore un sensore per monitorare eventuali sovratemperature nel condensatore.

Per validare ulteriormente il modello sviluppato, questo studio andrebbe ampliato valutando anche l'effetto dell'ampiezza della tensione di ripple e non solo della frequenza sulla vita del film. Pertanto, andrebbero eseguite prove di vita anche con ampiezze di ripple superiori al 10%, ad es. 20% e 30%. In ultimo andrebbero condotte anche prove di vita anche su un lotto di condensatori simili a quelli che verranno installati nella tamponatura, ad ulteriore conferma dei risultati ottenuti sul film.

7 Riferimenti bibliografici

1. I. Ghinello, G. Mazzanti, G. C. Montanari, D. Fabiani, and A. Cavallini, "Investigation of the endurance of capacitors supplied by nonsinusoidal voltage," in Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Annual Report, 1998, vol. 2, pp. 723–727.
2. G. C. Montanari, I. Ghinello, and D. Fabiani, "Accelerated degradation of capacitor PP films under voltage distortion," in Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Annual Report, 1998, vol. 2, pp. 686–689.
3. G. C. Montanari and D. Fabiani, "Searching for the factors which affect self-healing capacitor degradation under non-sinusoidal voltage," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 6, no. 3 (1999), pp. 319–325.
4. G. C. Montanari and D. Fabiani, "The effect of nonsinusoidal voltage on intrinsic aging of cable and capacitor insulating materials," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 6, no. 6 (1999), pp. 798–802.
5. A. Cavallini, D. Fabiani, G. Mazzanti, G. C. Montanari, and L. Simoni, "Analisi Affidabilistica di Condensatori di Potenza Sottoposti a Tensioni non Sinusoidali," in Atti Riunione biennale GUSEE, 1999.
6. A. Cavallini, D. Fabiani, G. Mazzanti, and G. C. Montanari, "Models for degradation of self-healing capacitors operating under voltage distortion and temperature," in Proceedings of the IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 2000, vol. 1, pp. 108–111.
7. A. Cavallini, D. Fabiani, G. Mazzanti, and G. C. Montanari, "Effect of power system harmonics on cable endurance a critical review to IEEE Std. 519 voltage distortion limits," in Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), 2000, vol. 5, pp. 3172–3178.

8. IEC 60505: 2004 Evaluation and Qualification of Electrical Insulation Systems, Ed. 3.0, 2004.
9. IEC 62539:2007 Guide for the Statistical Analysis of Electrical Insulation Breakdown Data, IEC Standard, 2007.
10. G. C. Montanari and L. Simoni, "Aging phenomenology and modeling", IEEE Trans. Electr. Insul., vol. 28 (1993), pp. 755-776.

8 Abbreviazioni ed acronimi

AR = Ageing Rate (Tasso di Invecchiamento)

IPM = Inverse Power Model (Modello Inversa Potenza)

PP = Polipropilene

RD = Rigidità Dielettrica

TS = Tensione di Scarica

VEC = Voltage Endurance Coefficient (Coefficiente di Voltage Endurance)

9 Appendice

CURRICULUM VITAE di **Davide Fabiani**, Professore Associato presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione 'G. Marconi' dell'Alma Mater Studiorum - Università di Bologna.

POSIZIONE ACCADEMICA

- 2017 ad oggi: abilitazione scientifica nazionale al ruolo di Professore Ordinario.
- 2014 ad oggi: Professore Associato di Tecnologie Elettriche Innovative.
- 2005-2014: Ricercatore Universitario.
- 2002-2005: Assegnista di Ricerca su "Diagnostica dei Sistemi Isolanti per Alte Tensioni" presso il Dip. di Ingegneria Elettrica dell'Università di Bologna.

EDUCAZIONE

- 2001: Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrotecnica presso l'Università di Bologna.
- 1998: Borsa di Studio finanziata da "Pirelli Cavi e Sistemi" presso l'Università di Bologna.
- 1998: Abilitazione alla Professione di Ingegnere.
- 1997: Laurea in Ingegneria Elettrica con lode - Università di Bologna.

ATTIVITA' DIDATTICA

2007ad oggi: ha insegnato in maniera continuativa come responsabile di vari corsi di laurea e master della Facoltà di Ingegneria e Architettura. Attualmente insegna Tecnologie Elettriche Innovative M e Progettazione e Diagnostica dei Sistemi di Isolamento Elettrici M per i corsi di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Ingegneria dell'Energia Elettrica e del corso di Elementi di Impianti Elettrici e Sicurezza T per la Laurea Magistrale in Ingegneria Civile.

ATTIVITA' DI RICERCA E PROGETTI

- Dal 2011 è Direttore Scientifico del Laboratorio di Materiali Innovativi per i Sistemi Elettrici (LIMES) del Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione dell'Università di Bologna.

- È membro fondatore del Gruppo di Ricerca sull'Elettrofilatura (RGE) dell'Università di Bologna.
- I suoi campi di ricerca riguardano principalmente:
 - Studio della diagnostica degli apparati in alta tensione, principalmente attraverso misure di scariche parziali (su cavi, trasformatori di potenza e macchine rotanti).
 - Valutazione dell'effetto delle forme d'onda non sinusoidali sull'affidabilità dei componenti e dei sistemi di isolamento (in particolare motori asincroni alimentati da convertitori elettronici di potenza).
 - Studio dei meccanismi di conduzione elettrica e del processo di invecchiamento nei sistemi di isolamento ad alta tensione, in particolare per i cavi di potenza.
 - Materiali nanostrutturati per applicazioni in apparati elettrici ed elettronici.
- Coinvolto come consulente scientifico in numerosi progetti di ricerca finanziati da enti pubblici e aziende private (Borealis, ABB, Siemens, Dow, SBM, VTT, Prysmian, Nexans, NKT) riguardanti la caratterizzazione, lo sviluppo, la modellazione e l'indagine sull'invecchiamento di materiali isolanti elettrici.
- *Principal Investigator* o *co-investigator* di diversi 5 progetti UE, 2 PRIN, 1 FISR e 2 POR-FESR.
- Autore di 245 articoli, pubblicati sulle principali riviste internazionali o presentati a convegni internazionali.
- H-index: 33, no di citazioni: 4498

ATTIVITA' ISTITUZIONALI E INCARICHI ACCADEMICI

- 2011 ad oggi: membro del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca. È stato supervisore di 8 dottorandi e ha svolto il ruolo di esaminatore esterno per 11 dottorandi in Italia, Francia, Canada, Regno Unito e Finlandia.
- 2011-oggi: membro del Centro di Ricerca "Meccanica Avanzata e Materiali" dell'Università di Bologna.
- 2016-ad oggi: responsabile dello scambio Erasmus con l'Università Paul Sabatier di Tolosa (Francia).
- 2019- ad oggi: Membro residente dell'Istituto di Studi Avanzati (ISA) dell'Università di Bologna.
- 2010-2012: membro della Giunta del Dipartimento di Ingegneria Elettrica.
- 2012-2015: membro del "Collegio Superiore" dell'Università di Bologna.
- Luglio 2006: visiting professor presso il NEETRAC della Georgia Tech University.

APPARTENENZA A COMITATI TECNICI, SCIENTIFICI ED EDITORIALI

- Membro del WG IEEE su *Nanodielectrics* dell'IEEE DEIS.
- Membro del WG CIGRE D1.40 *Functional Nanomaterials for Electric Power Industry* dal 2014 al 2017.
- Segretario del WG CIGRE D1.43 *Rotating machine insulation voltage endurance under fast, repetitive voltage transients* dal 2014 al 2017.
- Segretario del WG CIGRE D1.73 *Nanostructured dielectrics: Multi-functionality at the service of the electric power industry*
- Membro del IEC TC 112 "Evaluation and qualification of electrical insulating materials and systems" and TC 15 "Solid electrical insulating materials"
- 2014-2015: *Technical Program Committee Chair* della conferenza IEEE CEIDP.
- Vice-chair della conferenza internazionale IEEE ICSD tenutasi a Bologna nel luglio 2013.
- Membro del Comitato Scientifico della "International Youth Conference on Energy" (IYCE) dal 2007.
- Membro dell'Editorial Board di *IET High Voltage Journal* e del *Publications Board* di IEEE DEIS
- Guest Editor della Special Issue di *Frontiers in Electronic Materials* su *Polymers for High Electric Field Applications*, 2022.
- Guest Editor della Special Issue of *Energies* su "Nuclear Cable Insulation Management", 2021
- Guest Editor della Special di *High Voltage* su "Interface Charging Phenomena for Dielectric Materials", aprile 2020.

PREMI E RICONOSCIMENTI

- 2008 - Premio per il miglior paper della *Wire International Conference*.
- 2015 - Premio per il miglior paper alla conferenza IEEE ICPADM (Sidney, Australia).
- 2020 - *High Voltage Excellent Paper Award 2020*, per il paper "*Gas–solid interface charge characterisation techniques for HVDC GIS/GIL insulators*".
- 2021 - CSEE JPES *Excellent Paper Award* per il paper "*Surface charging phenomena on HVDC spacers for compressed SF6 insulation and charge tailoring strategies*".

ALTRE ATTIVITA'

- 2016 – ad oggi: Senior Member dell'IEEE DEIS.
- 2022: Vicepresidente amministrativo della IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society (DEIS)
- 2020-2021: Vicepresidente tecnico di IEEE DEIS
- 2016-2019: membro de Consiglio di Amministrazione della IEEE DEIS e Chair del DEIS Meetings Committee.
- 1999 -2015: socio fondatore di TechImp Spa, spin-off dell'Università di Bologna.