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

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Studio di un sistema PTO per OWC del tipo REWEC-GV basato su elastomeri elettroattivi

Rocco Vertechy

Report RdS/PAR2014/222

STUDIO DI UN SISTEMA PTO PER OWC DEL TIPO REWEC-GV BASATO SU ELASTOMERI ELETTROATTIVI

Rocco Vertechy (Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Industriale)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2014
Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente
Progetto: Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso
Obiettivo: Studio di un sistema PTO per REWEC-GV basato su elastomeri elettroattivi
Responsabile del Progetto: Gianmaria Sannino, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Studio di un sistema PTO per OWC del tipo REWEC-GV basato su elastomeri elettroattivi"
Responsabile scientifico ENEA: Gianmaria Sannino
Responsabile scientifico Università di Bologna: Rocco Vertechy

Indice

SOMMARIO 4

1 INTRODUZIONE 5

2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI 6

2.1 MODELLO MULTI-FISICO DELL'IMPIANTO REWEC-GV BASATO SU UN ICD-DEG PTO 6

2.1.1 Architettura complessiva dell'impianto di conversione 6

2.1.2 Modello idrodinamico dell'interfaccia primaria 8

2.1.3 Modello elettro-visco-elastico del ICD-DEG PTO 10

2.1.4 Accoppiamento dei sotto-modelli idrodinamico e elettro-viso-elastico 20

2.2 APPLICAZIONE DEL MODELLO MULTI-FISICO ALLO STUDIO DI UN ICD-DEG PTO PER CASSONE REWEC-GV 21

3 CONCLUSIONI 23

4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 24

Sommario

Questo documento riassume le attività effettuare ed i risultati ottenuti nel contesto dello studio di fattibilità di un nuovo sistema di power-take-off (PTO), di tipo polimerico e basato su generatori ad elastomero dielettrico (DEG), per il convertitore dell'energia dalle onde del mare REWEC-GV che è stato sviluppato dal Laboratorio NOEL dell'Università di Reggio Calabria.
Nello specifico, il documento si articola nella descrizione di un nuovo modello multi-fisico che è stato appositamente predisposto per la simulazione delle prestazioni complessive dell'impianto e nella presentazione dei risultati del dimensionamento del DEG PTO per il REWEC-GV. La descrizione è corredata di risultanze sperimentali, che sono state ottenute ed utilizzate sia per la formulazione che per la validazione del modello, e di dati di simulazione, che dimostrano le potenzialità dei DEG come sistemi di PTO per impianti a colonna d'acqua oscillante come il REWEC-GV.

1 Introduzione

I trasduttori ad elastomero dielettrico (TED) sono capacità deformabili funzionanti in maniera ciclica che consentono di convertire energia elettrica in energia meccanica e viceversa [1].

Nella loro architettura più semplice, i TED si compongono di una membrana di materiale elastomerico incomprimibile ed elettricamente isolante interposta tra due elettrodi cedevoli [1].

I materiali tipicamente utilizzati per la membrana dielettrica sono: gli elastomeri acrilici, la gomma naturale, la gomma stirenica e gli elastomeri siliconici. Quelli utilizzati per gli elettrodi cedevoli sono delle paste o delle gomme composite costituite da una matrice polimerica, di natura simile a quella usata per la membrana elastomerica, riempita mediante micro/nano-particelle conduttive quali nero di carbonio, rame o argento.

Grazie alle proprietà elettro-meccaniche intrinseche dei materiali utilizzati, i TED possono essere utilizzati come generatori, attuatori e sensori, beneficiando delle seguenti caratteristiche [1]: elevate densità di energia di conversione (sia per unità di peso che di volume); buona efficienza di conversione che risulta essere piuttosto indipendente dalla frequenza di funzionamento; elevata resistenza agli urti e alla corrosione; basso costo specifico (sia per unità di peso che di energia convertita in un ciclo); facilità di fabbricazione e di installazione; funzionamento silenzioso.

Primariamente investigati come attuatori per la robotica e in applicazioni biomedicali, i TED hanno recentemente dimostrato enormi potenzialità nel loro utilizzo come generatori di elettricità dalle onde del mare [2-4]. In particolare, nello studio di impianti di conversione a colonna d'acqua oscillante (generalmente denominati con l'acronimo OWC, dall'inglese "Oscillating Water Column"), l'impiego di TED circolari gonfiabili (d'ora in avanti denominati ICD-DEG, dall'inglese "inflatable circular diaphragm dielectric elastomer generators") in vece dei tradizionali turbogeneratori ha evidenziato i seguenti vantaggi potenziali: maggiore producibilità energetica a parità di interfaccia primaria e clima ondoso; minori costi di acquisto, installazione ed esercizio [5]. Accanto, le medesime ricerche hanno evidenziato come l'intrinseca risposta elastica dell'ICD-DEG renda difficile il posizionamento ottimale della risonanza naturale dell'impianto all'interno dello spettro di frequenza degli stati di mare di progetto.

In questo contesto, il presente documento riporta i risultati dello studio di fattibilità per l'applicazione di un ICD-DEG come sistema di estrazione (PTO, dall'inglese "power-take-off") per l'impianto di conversione di tipo OWC con condotto a geometria variabile (di seguito chiamato semplicemente REWEC-GV) installato presso il Laboratorio NOEL dell'Università di Reggio Calabria.

In particolare, il documento descrive:

1) Un modello multi-fisico che è stato predisposto per la simulazione delle prestazioni complessive dell'impianto (da onda del mare a rete elettrica);
2) I risultati del dimensionamento dell'ICD-DEG per il REWEC-GV e la matrice di potenza attesa per l'impianto complessivo che sono stati ottenuti mediante una campagna di simulazioni numeriche effettuate attraverso il modello multi-fisico predisposto.

Rispetto alle ricerche precedenti, i seguenti aspetti innovativi sono stati introdotti in questo studio:

- La particolare geometria a forma di U del condotto del REWEC-GV è considerata qui per la prima volta al fine di consentire il più facile posizionamento della risonanza naturale dell'impianto all'interno dello spettro di frequenza degli stati di mare di progetto;
- Il modello elettro-elastico del ICD-DEG qui utilizzato contiene una formulazione visco-elastica aggiornata che risulta essere più accurata della precedente [6];
- Il modello elettro-elastico del ICD-DEG include una nuova componente di dissipazione elettrica che consente di stimare le perdite di carica attraverso l'elastomero dielettrico che, nella pratica, è sempre caratterizzato da valori di resistività elettrica finiti;
- Le leggi costitutive ed i parametri del materiale da utilizzarsi nel modello elettro-elastico del ICD-DEG sono stati determinati attraverso una serie di indagini sperimentali condotte appositamente;
- La validità dei nuovi modelli per l'ICD-DEG solo e per l'ICD-DEG accoppiato ad un impianto di tipo OWC è stata verificata attraverso la comparazione dei risultati di simulazione con i risultati sperimentali disponibili da indagini effettuate precedentemente [4,7].

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Modello multi-fisico dell'impianto REWEC-GV basato su un ICD-DEG PTO

Questa sezione descrive il modello multi-fisico (da onda del mare ad elettricità) che è stato predisposto per la simulazione dell'impianto REWEC-GV equipaggiato con un PTO di tipo ICD-DEG. La presentazione si articola come di seguito: la sottosezione (2.1.1) descrive l'architettura complessiva dell'impianto di conversione; la sottosezione (2.1.2) descrive il modello idrodinamico dell'interfaccia primaria; la sottosezione (2.1.3) descrive il modello elettro-viso-elastico del ICD-DEG PTO; la sottosezione (2.1.4) descrive l'accoppiamento tra il modello idrodinamico e quello elettro-visco-elastico.

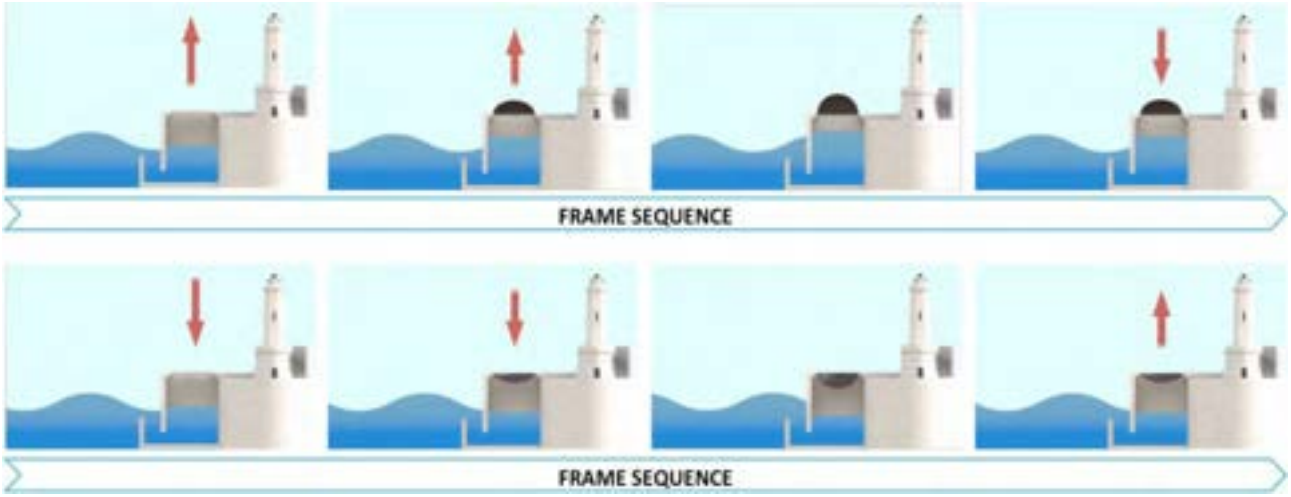


Figura 1. Impianto REWEC-GV equipaggiato con un ICD-DEG PTO.

2.1.1 Architettura complessiva dell'impianto di conversione

L'architettura complessiva ed il principio di funzionamento di un impianto REWEC-GV equipaggiato con un ICD-DEG PTO sono rappresentati in Figura 1. Il sistema ha come interfaccia primaria un cassone cavo (il REWEC-GV) che realizza un condotto a forma di U al suo interno. Il cassone è fissato a terra ed è semisommerso. Il condotto a U ha una apertura sott'acqua esposta alle onde del mare, l'altra in aria chiusa da un ICD-DEG, ed è riempito parzialmente da acqua (lato mare) e da aria (lato ICD-DEG).

Il funzionamento è il seguente: 1) l'azione che le onde del mare esercitano sull'apertura sommersa del cassone causa l'oscillazione di una colonna d'acqua entro il condotto a U; 2) il moto del pelo libero della colonna d'acqua induce la compressione-espansione reciproca dell'aria intrappolata tra la parte superiore del condotto e l'ICD-DEG; 3) la variazione di pressione dell'aria fa deformare ciclicamente l'ICD-DEG; 4) l'opportuno controllo delle cariche elettriche che risiedono sull'ICD-DEG durante il ciclo di deformazione consente di convertire l'energia pneumatica dell'aria compressa dalla colonna d'acqua in energia elettrica.

Il processo di conversione attuato dall'ICD-DEG è puramente elettrostatico e avviene secondo le seguenti fasi: 1) cariche elettriche vengono iniettate sugli elettrodi dell'ICD-DEG nella sua configurazione massimamente espansa (ovvero quando il valore della sua capacità elettrica è maggiore); 2) al diminuire della deformazione, la capacità elettrica si riduce determinando l'innalzamento del potenziale elettrico delle cariche iniettate e, in assenza di un prelievo di queste ultime, dell'energia elettrostatica immagazzinata dall'ICD-DEG. Le cariche elettriche il cui potenziale è stato innalzato possono essere prelevate durante o al termine della fase di ritorno della deformazione.

La massimizzazione dell'energia convertita dall'ICD-DEG richiede un prelievo del primo tipo, regolato in modo da realizzare nell'ICD-DEG valori di campo elettrico prossimi al massimo ammissibile (ovvero prossimi

al campo elettrico di rottura – detto anche rigidità elettrica - della membrana elastomerica dielettrica di cui l'ICD-DEG è composto) [8].
Durante il funzionamento regolare, l'ICD-DEG si deforma di circa il 100% e la sua capacità varia di circa quatto volte. L'ammontare dell'energia convertita dall'ICD-DEG è dunque significativamente superiore rispetto a quella che deve essere iniettata per innescare il processo di conversione. Nel regime di deformazione considerato, la risposta elastica dell'ICD-DEG è non trascurabile e piuttosto non lineare.
La particolare forma a U del condotto del REWEC-GV comporta l'aumento della massa della colonna d'acqua oscillante che è in grado di rimediare allo scompenso dovuto alla risposta elastica del l'ICD-DEG, consentendo dunque di posizionare al meglio la frequenza di risonanza dell'impianto complessivo durante la fase di progettazione.
Grazie alla non linearità della risposta elastica dell'ICD-DEG, la lenta regolazione (mediante valvole di flusso aggiuntive) della massa d'aria intrappolata tra la colonna d'acqua oscillante e l'ICD-DEG consente la taratura in opera dell'impianto al fine di adeguarne (in tempo reale) il funzionamento al contenuto in frequenza e ampiezza delle stato del mare incidente. In particolare, in presenza di mari molto agitati, che comportano grandi ampiezze di moto della colonna d'acqua, l'ICD-DEG può essere fatto oscillare simmetricamente rispetto alla sua configurazione piana di modo da generare elettricità due volte in ogni periodo dell'onda; viceversa, per mari calmi, l'ICD-DEG può essere fatto oscillare nei pressi di una delle sue due configurazioni più deformate in modo da massimizzare l'energia estraibile in un singolo ciclo.

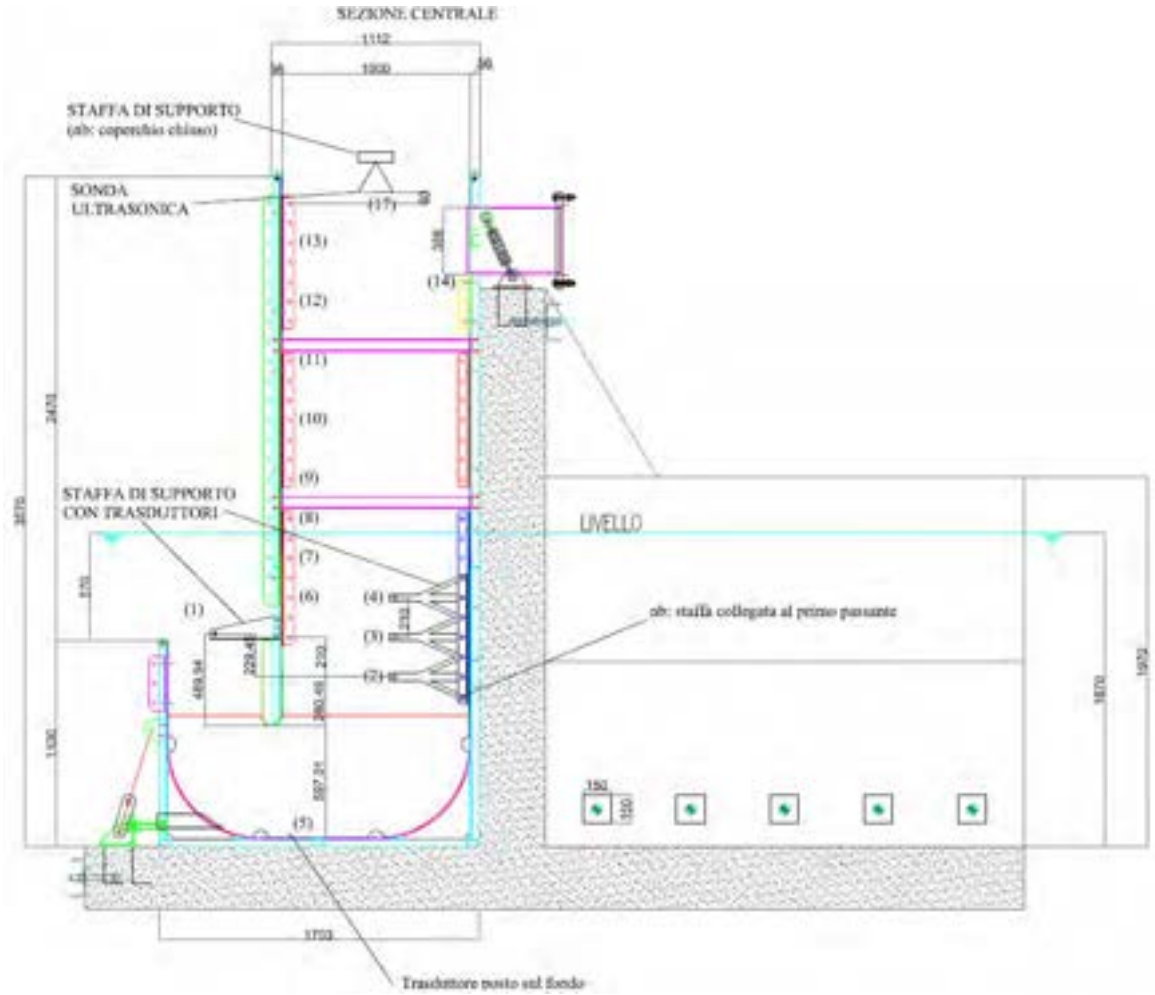


Figura 2. Disegno in sezione indicante la geometria esterna e del condotto a U del cassone REWEC-GV. Le dimensioni sono in millimetri.

2.1.2 Modello idrodinamico dell'interfaccia primaria

Questa sottosezione presenta il modello predisposto per la simulazione della risposta idrodinamica della colonna d'acqua oscillante all'interno del cassone REWEC-GV. Lo sviluppo del modello è stato effettuato in accordo allo stato dell'arte e alle comuni pratiche in vigore nel settore dell'energia dalle onde del mare [9]. In particolare, il modello predisposto è stato ottenuto partendo da una formulazione nota per la simulazione di impianti OWC di tipo generico [10] attraverso il ricalcolo dei parametri idrodinamici che sono stati specializzati per la geometria specifica del REWEC-GV rappresentata in Figura 2.

Data la non-linearità del comportamento elettro-elastico dell'ICD-DEG PTO, il modello idrodinamico del REWEC-GV richiede di essere espresso nel dominio del tempo [9, 10]. Il modello si fonda sulle seguenti ipotesi [10]:

- Teoria del flusso potenziale (flusso non viscoso e irrotazionale);
- Onde lineari (moti della colonna d'acqua contenuti e rapporti ridotti tra altezza dell'onda e lunghezza dell'onda e tra altezza dell'onda e profondità del fondale);
- Il comportamento idrodinamico complessivo del REWEC-GV è descrivibile da un unico grado di libertà corrispondente al movimento del pelo libero della colonna d'acqua che è supposto muoversi mantenendosi sempre orizzontale (semplificazione nota come "massless rigid piston approximation");
- Il modello è formulato prima nel dominio della frequenza, che consente la determinazione dei parametri idrodinamici (inclusi la massa aggiunta, lo smorzamento da radiazione e la forza eccitante) mediante codice software commerciale del tipo "boundary element method" (BEM), ed è poi convertito in un modello nello spazio degli stati mediante una procedura di identificazione nota [11].

Nello specifico, la procedura impiegata per la definizione del modello è descritta nel prosieguo.

Nel dominio del tempo, si assume che l'idrodinamica del REWEC-GV sia rappresentata dalla equazione seguente [10]

$$\int_{-\infty}^{\infty}\left[M_{add}(\omega)\cdot i\cdot\omega+B(\omega)\right]\cdot x(\omega)\cdot i\cdot\omega\cdot e^{2\pi i\tau\omega}\cdot d\omega+\rho_w\cdot g\cdot S\cdot x(\tau)= \\ =\sum_{j=1}^{n}A_{w,j}\cdot\Gamma(\omega_j)\cdot\cos(\omega_j\cdot\tau+\varphi_j)+S\cdot p(\tau)\,, \tag{1}$$

dove:

- $x(\tau)$ e $x(\omega)$ identificano lo spostamento del pelo libero della colonna d'acqua, espresso in funzione rispettivamente del tempo τ e della pulsazione ω, e misurato rispetto il livello medio;
- π è la costante di Archimede;
- i è l'unità immaginaria;
- $M_{add}(\omega)$ identifica la massa aggiunta della colonna d'acqua, espressa in funzione della pulsazione ω, che rappresenta l'inerzia delle particelle d'acqua che si muovono durante l'oscillazione del pelo libero;
- $B(\omega)$ identifica lo smorzamento da radiazione, espresso in funzione della pulsazione ω, che rappresenta l'energia dissipata dalle onde che prendono origine dal moto della colonna d'acqua e si propagano all'infinito;
- ρ_w è la densità dell'acqua;
- g è l'accelerazione gravitazionale;
- S è la sezione della colonna d'acqua oscillate, lato ICD-DEG;
- $A_{\omega j}$ è l'ampiezza della j-esima onda monocromatica di pulsazione ω_j appartenete alla distribuzione spettrale secondo cui lo stato di mare considerato è stato decomposto;
- φ_j sono numeri random di valore compreso tra 0 e $2\cdot\pi$;
- $\Gamma(\omega)$ identifica il coefficiente d'eccitazione, espresso in funzione della pulsazione ω, che rappresenta l'azione forzante agente sulla colonna d'acqua dovuta alla presenza delle onde del mare;

- $p(\tau)$ è la pressione relativa all'interno della camera d'aria, misurata rispetto a quella atmosferica ed espressa in funzione del tempo τ, che rappresenta l'azione forzante agente sulla colonna d'acqua dovuta alla presenza dell'ICD-DEG.

Nell'equazione (1), le costanti π, i, g e ρ_w sono note. Il valore di S è definito direttamente dalla geometria del REWEC-GV riportata in Figura 2. I coefficienti $M_{add}(\omega)$, $B(\omega)$ e $\Gamma(\omega)$ possono essere determinati mediante software BEM commerciale (ad esempio WAMIT, ANSYS-AQUA e NEMOH) sulla base della geometria del REWEC-GV riportata in Figura 2; i valori di $A_{\omega,j}$, relativi ad ogni ω_j, posso essere determinati assumendo una distribuzione spettrale del tipo Joanswap e, dunque, attraverso l'equazione

$$A_{w,i} = \sqrt{2\Delta f_j \left[0.205 H_s^{\,2} T_p^{\,-4} \left(f_j\right)^{-5} \exp\left[-1.25 \left(T_p f_j\right)^{-4} \right] \gamma^q \right]}, \tag{2.1}$$

dove $f_j = \omega_j / 2\pi$, Δf_j rappresenta il passo tra due valori di frequenza successivi della distribuzione spettrale assunta, H_s e T_p indicando l'altezza d'onda significativa ed il periodo di picco dello stato di mare considerato, $\gamma = 3.3$, mentre q è dato da

$$q = \exp\left[-\left(T_p f_j - 1\right)^2 \Big/ \left(2\sigma^2\right) \right], \tag{2.2}$$

con

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{se } T_p f_j \le 1 \\ 0.09 & \text{se } T_p f_j > 1 \end{cases}. \tag{2.3}$$

Gli integrali presenti nell'equazione (1) non sono di immediata soluzione. Dunque, al fine di migliorare l'efficienza computazionale del modello idrodinamico, tali termini sono stati rimpiazzati con un modello approssimato nello spazio degli stati, ovvero attraverso il seguente sistema [11]

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \left[M_{add}(\omega) \cdot i \cdot \omega + B(\omega) \right] \cdot x(\omega) \cdot i \cdot \omega \cdot e^{2\pi i \tau \omega} \cdot d\omega \approx \boldsymbol{C}^T \boldsymbol{y} \\ \dot{\boldsymbol{y}} = \mathbf{A}\boldsymbol{y} + \boldsymbol{B}\dot{x} \end{cases}, \tag{3}$$

dove il vettore $\boldsymbol{y}$ è costituito da variabili di stato interne, il cui numero m deve essere definito mediante un procedimento iterativo volto a determinare il miglior compromesso tra accuratezza della soluzione e complessità computazionale, mentre le componenti della matrice diagonale $\mathbf{A}$ e dei vettori $\boldsymbol{C}$ e $\boldsymbol{B}$ possono essere determinati mediante una procedura d'interpolazione nel dominio della frequenza che è volta ad approssimare la funzione che in equazione (3) è espressa tra parentesi quadre mediante la sommatoria di m funzioni razionali aventi a denominatore dei polinomi di grado uno.

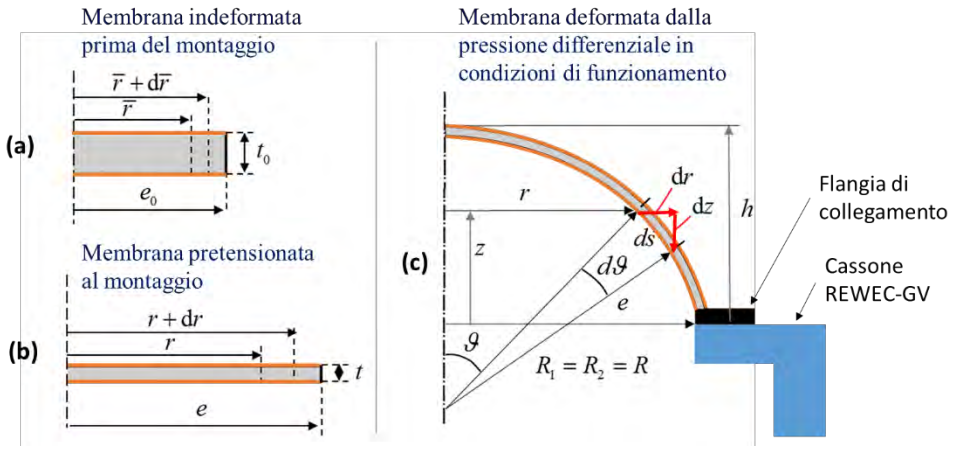


Figura 3. Schema eseguito in sezione assiale dell'ICD-DEG: a) configurazione indeformata prima del montaggio; b) configurazione pretensionata al montaggio; c) configurazione deformata dalla pressione differenziale dell'aria durante il funzionamento. L'elastomero dielettrico è disegnato in grigio; gli elettrodi deformabili in arancio.

2.1.3 Modello elettro-visco-elastico dell'ICD-DEG PTO

Questa sottosezione presenta il modello dinamico predisposto per la simulazione della risposta elettro-meccanica del PTO di tipo ICD-DEG.

Come illustrato in Figura 3, l'ICD-DEG è una membrana TED di forma circolare che viene montata sulla parte superiore del cassone REWEC-GV in configurazione piana e stato pretensionato mediante una flangia che è in grado di vincolarla perimetralmente.

Al fine di limitare la complessità computazionale, il modello predisposto per l'ICD-DEG è di tipo ridotto, a parametri concentrati (con un solo grado di libertà cinematico) e nel dominio del tempo, ed è stato ottenuto partendo da un modello precedentemente sviluppato per la medesima tipologia di convertitore [6], apportando le seguenti migliorie: 1) la legge costitutiva per il comportamento visco-elastico è stata modificata al fine di catturare con migliore accuratezza le dissipazioni meccaniche che avvengono durante la deformazione ciclica dell'ICD-DEG; 2) una componente rappresentativa della resistività finita dei materiali elastomerici dielettrici è stata introdotta al fine di modellare anche le perdite elettriche che avvengono durante la conversione dell'energia pneumatica in elettricità.

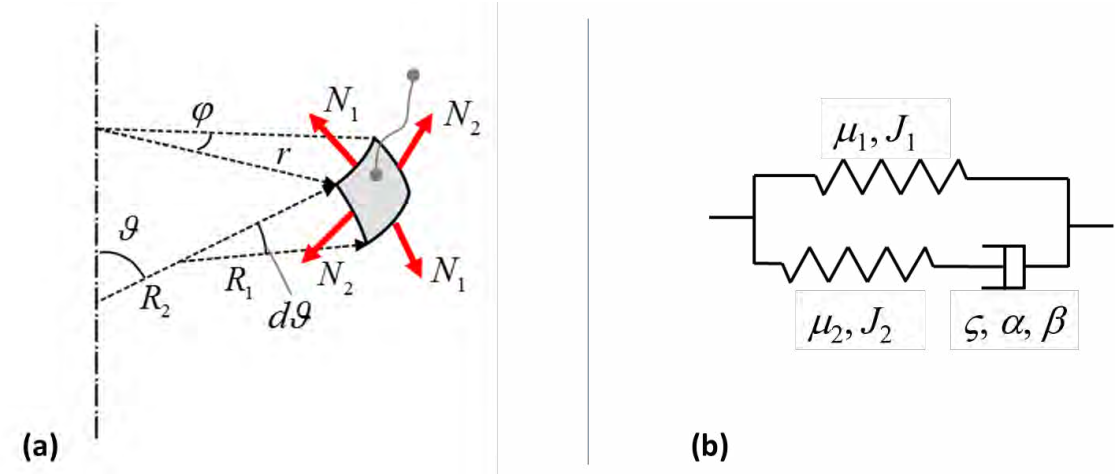


Figura 4. Ipotesi semplificative adottate per la modellazione dell'ICD-DEG: a) elemento infinitesimo dell'ICD-DEG assunto come un guscio sottile; b) modello visco-iperelastico di tipo Zener.

Il modello ridotto si fonda sulle seguenti ipotesi [6]:

- L'ICD-DEG si comporta come un guscio sottile che lavora in regime di grosse deformazioni (come nelle Figure 3 e 4a);

- Dal punto di vista meccanico, il materiale di cui è fatto l'ICD-DEG ha un comportamento visco-iperelastico standard (ovvero rappresentabile attraverso il modello di tipo Zener di Figura 4b, avente una rete iperelastica (rete 1) posta in parallelo alla composizione seriale di uno smorzatore e di un'altra rete iperelastica (rete 2));
- Dal punto di vista elettrico, il materiale di cui è fatto l'ICD-DEG è un dielettrico non perfetto (vedi Figura 6), con permittività elettrica costante, rigidità dielettrica dipendente dalla deformazione e conduttività elettrica dipendente dal campo elettrico;
- In ogni configurazione deformata, l'ICD-DEG assume la forma di una calotta sferica e lo stato di deformazione è prettamente equi-biassiale ma non uniforme (gli allungamenti principali dipendono dall'altezza del vertice della calotta (variabile h in Figura 3c) e dalla distanza radiale dall'asse di simmetria dell'ICD-DEG (variabile r nelle Figure 3b e 3c));
- La capacità dell'ICD-DEG è equivalente a quella di una membrana piana avente medesima estensione in area e medesimo spessore variabile di quelli dell'ICD-DEG.

Nello specifico, la procedura impiegata per la definizione del modello è descritta nel prosieguo.
Usando l'ipotesi del guscio sottile, lo stato di deformazione dell'ICD-DEG può essere definito, in ogni punto, dai tre allungamenti principali

$$\lambda_1 = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}\bar{r}} = \frac{\sqrt{\mathrm{d}r^2 + \mathrm{d}z^2}}{\mathrm{d}\bar{r}}, \tag{4.1}$$

$$\lambda_2 = \frac{r}{\bar{r}}, \tag{4.2}$$

$$\lambda_3 = \lambda_1^{-1}\lambda_2^{-1}, \tag{4.3}$$

essendo λ_1 e λ_2 lungo le direzioni longitudinale e latitudinale, e dove $\mathrm{d}s$ indica la lunghezza infinitesima nella direzione longitudinale dell'elemento guscio identificato dalla variabile radiale $\bar{r}$ (e di lunghezza longitudinale $\mathrm{d}\bar{r}$) nella configurazione indeformata e da quella radiale r e assiale z nella generica configurazione deformata di funzionamento. La relazione (4.3) tiene conto della natura incomprimibile dei materiali elastomerici dielettrici.
Assumendo un comportamento elettro-visco-iperelastico del materiale, le tensioni principali lungo le direzioni longitudinale e latitudinale possono essere espresse da

$$\sigma_1 = \lambda_1 \frac{\partial \Psi}{\partial \lambda_1}, \tag{5.1}$$

$$\sigma_2 = \lambda_2 \frac{\partial \Psi}{\partial \lambda_2}, \tag{5.2}$$

dove Ψ è la funzione della densità di energia libera dell'elastomero dielettrico che ne rappresenta il comportamento elettromeccanico specifico. Poiché i materiali considerati si suppongono a permittività elettrica costante e comportamento visco-iperelastico standard, la seguente forma per la funzione Ψ è qui considerata

$$\Psi = \Psi_{\mathrm{st}} - \Psi_{\mathrm{es}}, \tag{6}$$

dove Ψ_{es} è la densità di energia elettrostatica, ovvero

$$\Psi_{es} = \frac{1}{2}\varepsilon\lambda_1^2\lambda_2^2\left(\frac{V}{t_0}\right)^2, \tag{7}$$

mentre Ψ_{st} è la densità di energia di deformazione complessiva delle due reti iperelastiche del modello Zener (rappresentato in Figura 4b) e assunta nella forma suggerita da Gent, ovvero

$$\Psi_{st} = -\frac{\mu_1 J_1}{2}\log\left(1-\frac{\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2}-3}{J_1}\right) - \frac{\mu_2 J_2}{2}\log\left(1-\frac{\lambda_1^2\lambda_{1,v}^{-2}+\lambda_2^2\lambda_{2,v}^{-2}+\lambda_{1,v}^2\lambda_{2,v}^2\lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2}-3}{J_2}\right). \tag{8}$$

Nell'equazione (7), la costante positiva ε è la permittività elettrica del materiale (da determinarsi mediante prove sperimentali), il parametro t_0 è lo dello spessore iniziale dell'ICD-DEG (noto in funzione della geometria di quest'ultimo), mentre la variabile V è la differenza di potenziale elettrico applicata agli elettrodi dell'ICD-DEG. Nell'equazione (8), le costanti positive del materiale μ_1, μ_2, J_1 e J_2 sono il modulo di taglio ed il valore limite del primo invariante di deformazione delle due reti iperelastiche (da determinarsi mediante prove sperimentali), mentre $\lambda_{1,v}$ e $\lambda_{2,v}$ sono due variabili interne aggiuntive che sono associate allo scorrimento viscoso del materiale (ovvero, della seconda rete iperelastica) e dipendenti dalla coordinata $\bar{r}$ e dal tempo τ (dunque, $\lambda_{1,v}(\bar{r},\tau)$ e $\lambda_{2,v}(\bar{r},\tau)$). Vista l'equazione (8), le (5) possono essere riscritte come segue

$$\sigma_1 = \sigma_{1,eq} + \sigma_{1,neq} - \sigma_{es}, \tag{9.1}$$

$$\sigma_2 = \sigma_{2,eq} + \sigma_{2,neq} - \sigma_{es}, \tag{9.2}$$

dove

$$\sigma_{es} = \varepsilon\lambda_1^2\lambda_2^2\left(\frac{V}{t_0}\right)^2, \tag{10}$$

$$\sigma_{eq,1} = \frac{\mu_1 J_1\left(\lambda_1^2-\lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2}\right)}{J_1-\lambda_1^2-\lambda_2^2-\lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2}+3}, \tag{11.1}$$

$$\sigma_{eq,2} = \frac{\mu_2 J_2\left(\lambda_2^2-\lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2}\right)}{J_2-\lambda_1^2-\lambda_2^2-\lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2}+3}, \tag{11.2}$$

$$\sigma_{neq,1} = \frac{\mu_2 J_2\left(\lambda_1^2\lambda_{1,v}^{-2}-\lambda_{1,v}^2\lambda_{2,v}^2\lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2}\right)}{J_2-\lambda_1^2\lambda_{1,v}^{-2}-\lambda_2^2\lambda_{2,v}^{-2}-\lambda_{1,v}^2\lambda_{2,v}^2\lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2}+3}, \tag{11.3}$$

$$\sigma_{neq,2} = \frac{\mu_2 J_2\left(\lambda_2^2\lambda_{2,v}^{-2}-\lambda_{1,v}^2\lambda_{2,v}^2\lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2}\right)}{J_2-\lambda_1^2\lambda_{1,v}^{-2}-\lambda_2^2\lambda_{2,v}^{-2}-\lambda_{1,v}^2\lambda_{2,v}^2\lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2}+3}. \tag{11.4}$$

Nelle equazioni (9)-(11), i termini $\sigma_{eq,1}$ e $\sigma_{eq,2}$ tengono conto della risposta elastica statica dell'ICD-DEG, mentre i termini $\sigma_{neq,1}$ e $\sigma_{neq,2}$ sono rappresentativi delle sovra/sotto-tensioni dovute alla viscosità del

materiale, il cui contributo diventa sempre più importante al crescere della velocità di deformazione dell'ICD-DEG.
Per quel che concerne le variabili interne, per regioni di consistenza termodinamica [12], la loro dinamica è regolata dalle seguenti equazioni costitutive

$$\frac{\mathrm{d}\lambda_{1,v}}{\mathrm{d}\tau}=\lambda_{1,v}\left[\left(\lambda_{N,v}-1\right)^{-\alpha}\left(\sigma_{N,neq}/\mu_2\right)^{\beta-1}\right]\frac{\sigma_{1,neq}-\sigma_{dev,neq}}{2\varsigma\mu_2}, \tag{12.1}$$

$$\frac{\mathrm{d}\lambda_{2,v}}{\mathrm{d}\tau}=\lambda_{2,v}\left[\left(\lambda_{N,v}-1\right)^{-\alpha}\left(\sigma_{N,neq}/\mu_2\right)^{\beta-1}\right]\frac{\sigma_{2,neq}-\sigma_{dev,neq}}{2\varsigma\mu_2}, \tag{12.2}$$

dove le costanti positive α ($\alpha\in[0,1]$), β e ς sono parametri del materiale (da determinarsi mediante prove sperimentali; in particolare, ς identifica il tempo di rilassamento della seconda rete iperelastica), mentre le funzioni

$$\sigma_{dev,neq}=\left(\sigma_{1,neq}+\sigma_{2,neq}\right)/3, \tag{13}$$

$$\sigma_{N,neq}=\sqrt{\left(\sigma_{1,neq}-\sigma_{dev,neq}\right)^2+\left(\sigma_{2,neq}-\sigma_{dev,neq}\right)^2+\left(\sigma_{dev,neq}\right)^2}, \tag{14}$$

$$\lambda_{N,v}=\sqrt{\left(\lambda_{1,v}^2+\lambda_{2,v}^2+\lambda_{1,v}^{-2}\lambda_{2,v}^{-2}\right)/3}, \tag{15}$$

corrispondono alla tensione deviatorica, alla tensione effettiva e all'allungamento effettivo di distorsione della seconda rete iperelastica.

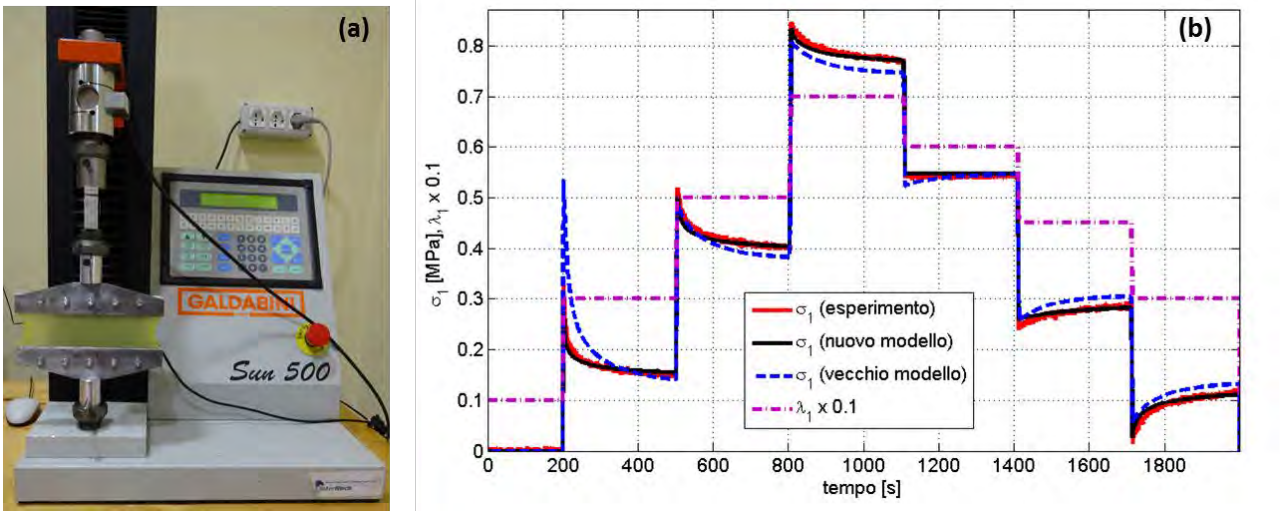


Figura 5. Validazione sperimentale del nuovo modello visco-elastico e confronto con quello precedente [6]: a) macchina di prova con provino del tipo "a taglio puro"; b) confronto tra la risposta sperimentale (linea continua in rosso) e le curve simulate mediante il nuovo modello (linea continua in nero) ed il modello precedente [6] (linea blu tratteggiata). Materiale: elastomero acrilico. Parametri dei modelli: μ_1 = 18 kPa; J_1 = 110; μ_2 = 42 kPa; J_2 = 55; ς = 90 s^{-1}; α = 0.5; β = 3 (per il modello vecchio α = 0; β = 1).

Rispetto alla versione precedente del modello visco-elastico dell'ICD-DEG [6], le equazioni (12) per la dinamica del rilassamento contengono il nuovo termine incluso tra le parentesi quadre, che è in grado di catturare con maggiore accuratezza la dipendenza della velocità di rilassamento sia dallo stato tensionale che da quello di deformazione. Il miglior comportamento della nuova versione del modello è stata

verificata mediante prove sperimentali effettuate appositamente durante il progetto sottoponendo a test di rilassamento una membrana di elastomero acrilico con provino del tipo "a taglio puro" caratterizzato da λ_2 = 1 (vedi Figura 5a). Durante il test, il provino è stato fatto transitare velocemente (in circa 2 secondi) tra due successivi livelli di deformazione longitudinale (nello specifico λ_1 = 1, λ_1 = 3, λ_1 = 5, λ_1 = 7; curva tratto-punto di color magenta in Figura 5b) nei quali è stato fatto sostare per circa 300 secondi. Come si evince dalla Figura 5b, il confronto tra la tensione sperimentale misurata (curva continua in rosso) e quelle simulate evidenzia la maggiore accuratezza del nuovo modello (curva continua in nero) rispetto alla versione precedente (curva tratteggiata in blu).
Sulla base delle variabili e delle relazioni definite sopra, indicando con ρ la densità dell'elastomero dielettrico, il comportamento dinamico dell'ICD-DEG soggetto ad una pressione differenziale $p(\tau)$ ed alla differenza di potenziale elettrico $V(\tau)$ può determinarsi risolvendo, assieme alla (12), il seguente sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali

$$\begin{cases} \rho r \dfrac{\partial^2 r}{\partial \tau^2} = \dfrac{\partial}{\partial \overline{r}}\left(\dfrac{r\sigma_1}{\lambda_1^2} \dfrac{\partial r}{\partial \overline{r}} \right) - \dfrac{r\lambda_2 p}{t_0} \dfrac{\partial z}{\partial \overline{r}} - \dfrac{\sigma_2}{\lambda_2} \\ \rho r \dfrac{\partial^2 z}{\partial \tau^2} = \dfrac{\partial}{\partial \overline{r}}\left(\dfrac{r\sigma_1}{\lambda_1^2} \dfrac{\partial z}{\partial \overline{r}} \right) + \dfrac{r\lambda_2 p}{t_0} \dfrac{\partial r}{\partial \overline{r}} - \rho g r \end{cases}, \tag{16}$$

utilizzando le seguenti condizioni al contorno

$$\begin{cases} r(e_0,\tau) = e,\ r(0,\tau) = 0,\ z(e_0,\tau) = 0,\ \dfrac{\partial z}{\partial \overline{r}}(0,\tau) = 0 \\ z(\overline{r},0) = 0,\ r(\overline{r},0) = e\overline{r}/e_0 \end{cases}, \tag{17}$$

$$\lambda_{1,v}(\overline{r},0) = \lambda_1(\overline{r},0), \tag{18.1}$$

$$\lambda_{2,v}(\overline{r},0) = \lambda_2(\overline{r},0). \tag{18.2}$$

Poiché la soluzione delle equazioni appena descritte richiede un tempo computazionale di gran lunga superiore rispetto al quello del modello idrodinamico introdotto alla sezione 2.1.2, gli infiniti gradi di libertà cinematici dell'ICD-DEG sono stati ridotti ad uno solo, identificato nell'altezza h del vertice del guscio indicata in Figura 3c, attraverso l'assunzione tale per cui in ogni sua configurazione deformata l'ICD-DEG ha la forma di una calotta perfettamente sferica. Questa assunzione è lecita poiché: la densità dei materiali elastomerici considerati è relativamente bassa ($\rho \approx$ 1000 kg·m^{-3}); la deflessione dell'ICD-DEG è contenuta nel campo $|h| < e$; le accelerazioni sono contenute nel campo $|\ddot{h}| < g$ (g = 9.8 m·s^{-2}).
In tale assunzione, la semplificazione seguente viene ottenuta

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda(h,\overline{r}) = ee_0\left(h^2 + e^2\right) \Big/ \left(e^2 e_0^2 + h^2 \overline{r}^2\right), \tag{19}$$

dove i parametri e ed e_0 indicano le dimensioni radiali dell'ICD-DEG prima e dopo il montaggio (come da Figure 3a e 3b).
Accanto, l'equazione della risposta dinamica dell'ICD-DEG si riduce alla risoluzione del seguente bilancio energetico

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\tau}\left(\mathrm{K} + \mathrm{U}_g + \mathrm{U}_{me} + \mathrm{U}_{el}\right) - W_{me} - W_{el} \le 0. \tag{20}$$

In (20), K e U_g sono l'energia cinetica e potenziale di gravità dovute alla densità ρ dell'ICD-DEG, ovvero

$$\mathrm{K}=\int_0^{R\arcsin(e/R)}\pi\rho\left[\left(\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}\tau}\right)^2+\left(\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}\tau}\right)^2\right]tr\mathrm{d}s=\pi\rho t_0\int_0^{e_0}\left[\left(\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}\tau}\right)^2+\left(\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}\tau}\right)^2\right]\bar{r}\mathrm{d}\bar{r}\,, \tag{21}$$

$$\mathrm{U}_g=\int_0^{R\arcsin(e/R)}2\pi\rho gztr\mathrm{d}s=2\pi\rho gt_0\int_0^{e_0}z\bar{r}\mathrm{d}\bar{r}\,. \tag{22}$$

U_{el} è l'energia elettrostatica immagazzinata all'interno dell'ICD-DEG, ovvero

$$\mathrm{U}_{el}=\int_0^{R\arcsin(e/R)}2\pi\left(\frac{1}{2}\varepsilon E^2\right)tr\mathrm{d}s=\frac{1}{2}CV^2\,, \tag{23}$$

dove C è la capacità dell'ICD-DEG, espressa da

$$C(h)=\int_0^{R\arcsin(e/R)}\varepsilon\frac{2\pi r}{t}\mathrm{d}s=\frac{\pi\varepsilon ee_0}{3t_0}\lambda_{\mathrm{T}}\left(\lambda_{\mathrm{T}}^2+\frac{e}{e_0}\lambda_{\mathrm{T}}+\frac{e^2}{e_0^2}\right), \tag{24}$$

che dipende unicamente dall'allungamento al vertice dell'ICD-DEG identificato dalla quantità

$$\lambda_{\mathrm{T}}(h,0)=\left(h^2+e^2\right)\big/\left(ee_0\right). \tag{25}$$

W_{me} è la potenza meccanica dovuta all'azione della differenza di pressione p che agisce sull'ICD-DEG, ovvero

$$W_{me}=p\dot{\Omega}_{\mathrm{G}}\,, \tag{26}$$

dove Ω_{G} è il volume sotteso dall'ICD-DEG e dato da

$$\Omega_{\mathrm{G}}=\frac{\pi h}{6}\left(3e^2+h^2\right). \tag{27}$$

U_{me} è l'energia potenziale elastica immagazzinata all'interno dell'ICD-DEG, ovvero

$$\mathrm{U}_{me}=\int_0^{R\arcsin(e/R)}2\pi\Psi_{\mathrm{st}}(\lambda)tr\mathrm{d}s=2\pi t_0\int_0^{e_0}\Psi_{\mathrm{st}}(\lambda)\bar{r}\mathrm{d}\bar{r}\,, \tag{28}$$

dove Ψ_{st} è la densità di energia di deformazione semplificata

$$\Psi_{\mathrm{st}}=-\frac{\mu_1 J_1}{2}\log\left(1-\frac{2\lambda^2+\lambda^{-4}-3}{J_1}\right)-\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\mu_2 J_2}{2}\log\left(1-\frac{2\lambda_{i,*}^2\lambda_{i,v}^{-2}+\lambda_{i,v}^4\lambda_{i,*}^{-4}-3}{J_2}\right)\left(u\left(\bar{r}-\bar{r}_{i-1}\right)-u\left(\bar{r}-\bar{r}_i\right)\right)\right], \tag{29}$$

nella quale $u(\bullet)$ indica la funzione a gradino di Heaviside e in aggiunta

$$\lambda_{i,*}(h)=ee_0\left(h^2+e^2\right)\Big/\left[e^2e_0^2+h^2\left(0.5(\bar{r}_{i-1}+\bar{r}_i)\right)^2\right]. \tag{30}$$

In analogia all'equazione (8), la (29) è funzione dell'allungamento λ dato dalla (19) e delle n variabili interne $\lambda_{i,v}$ che descrivono l'evoluzione del rilassamento viscoso della seconda rete iperelastica nei punti della membrana che nella configurazione indeformata sono collocati ai raggi $\overline{r}_i = i e_0 / n$. Nella pratica, rispetto alla (8), la (29) rimpiazza la densità di energia di deformazione della seconda rete iperelastica con la somma di n funzioni, l'i-esima delle quali è attiva solamente nello specifico sottodominio dell'ICD-DEG che, nella configurazione indeformata, è compreso tra i raggi $\overline{r}_i$ e $\overline{r}_{i-1}$.

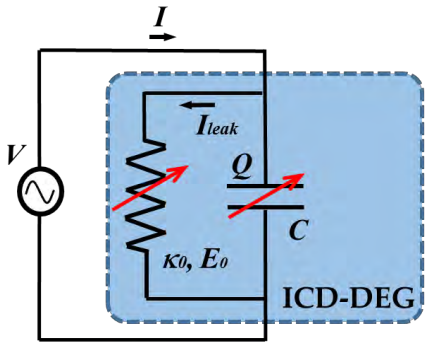


Figura 6. Modello elettrico del ICD-DEG assunto come il parallelo tra una capacità variabile, di valore dipendente dalla deformazione, e di una resistenza variabile avente conduttività funzione del campo elettrico.

Infine, per quel che concerne l'ultimo termine nell'equazione (20), W_{el} è la potenza elettrica scambiata dall'ICD-DEG con un circuito esterno, ovvero

$$W_{el} = VI\,, \tag{31}$$

dove I è la corrente fornita (se di segno positivo) o assorbita (se di segno negativo) dal circuito elettrico ed espressa, nel caso di resistività finita del materiale elastomerico dielettrico impiegato (ovvero assumendo il modello di Figura 6), dalla relazione

$$I = \dot{Q} + I_{leak}\,, \tag{32}$$

essendo Q la carica che giace sugli elettrodi dell'ICD-DEG, ovvero

$$Q = CV\,, \tag{33}$$

ed essendo I_{leak} la corrente di dispersione che scorre attraverso l'ICD-DEG, avente l'espressione

$$I_{leak} = V \int_0^{R\arcsin(e/R)} \kappa(E)\frac{2\pi r}{t}\,\mathrm{d}s\,. \tag{34}$$

Nell'equazione (34), $\kappa(E)$ è la conduttività elettrica dell'elastomero dielettrico, dipendente dal campo elettrico E ($E = V / t$) che agisce nel materiale. Sulla base di misure sperimentali effettuate appositamente durante questo progetto, una legge esponenziale del tipo

$$\kappa(E) = \kappa_0 \exp(E/E_0) \tag{35}$$

è stata scelta per la conduttività elettrica, dove κ_0 ed E_0 sono due costanti positive del materiale da determinarsi sperimentalmente attraverso una procedura d'interpolazione. La buona corrispondenza tra i

valori sperimentali di conduttività e la predizione del modello dato dall'equazione (35) è dimostrata in Figura 7a che riporta il caso di un elastomero acrilico.

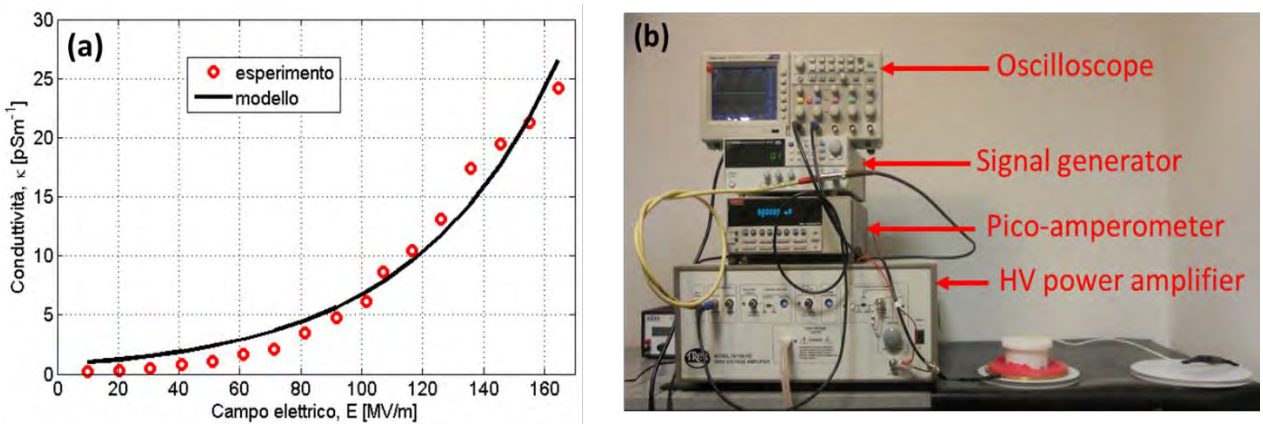


Figura 7. Validazione sperimentale del nuovo modello per le dissipazioni elettriche dell'ICD-DEG: a) confronto tra risposta sperimentale (cerchi colorati in rosso) e modello (linea continua in nero); b) apparato di prova utilizzato per le misure sperimentali. Materiale: elastomero acrilico. Parametri del modello: κ_0 = 0.8 pSm^{-1}, E_0 = 47 MVm^{-1}.

Con tutte le quantità e relazioni introdotte, assumendo infine h, $\lambda_{i,v}$ e V come le variabili indipendenti, il soddisfacimento dell'equazione (20) porta alle seguenti relazioni

$$\ddot{h}\frac{\partial}{\partial \dot{h}}\left(\mathrm{K}\right)+\dot{h}\frac{\partial}{\partial h}\left(\mathrm{K}+\mathrm{U}_g+\mathrm{U}_{me}\right)-\dot{h}p\frac{\partial}{\partial h}\left(\Omega_{\mathrm{G}}\right)=\dot{h}\frac{V^2}{2}\frac{\partial}{\partial h}\left(C\right), \tag{36}$$

$$\frac{\partial \Psi_{\mathrm{st}}}{\partial \lambda_{i,v}}\dot{\lambda}_{i,v}-V^2\int_0^{R\arcsin\left(e/R\right)}\kappa\left(E\right)\frac{2\pi r}{t}\mathrm{d}s\le 0,\qquad \text{for } i=1,\ldots,n\,. \tag{37}$$

L'equazione (36) descrive la risposta dinamica dell'ICD-DEG e può essere ricondotta nella seguente forma

$$\ddot{h}=\frac{p+\Lambda\left(h\right)V^2-\mathrm{B}\left(h\right)\dot{h}^2-\sum_{i=1}^{n}\mathrm{K}_i\left(h,\lambda_{i,v}\right)h}{\mathrm{M}\left(h\right)}, \tag{38}$$

dove i termini $\Lambda(h)$, $\mathrm{B}(h)$, $\mathrm{K}_i(h,\ \lambda_{i,v})$ e $\mathrm{M}(h)$ possono essere espressi in forma chiusa attraverso la manipolazione delle equazioni (21)-(33).
L'equazione (37) impone la consistenza termodinamica del modello dissipativo, che consente di definire la legge di evoluzione delle variabili interne $\lambda_{i,v}$ che descrivono lo scorrimento viscoso della seconda rete iperelastica. Similmente alla (12), la seguente equazione costitutiva è stata scelta

$$\frac{\mathrm{d}\lambda_{i,v}}{\mathrm{d}\tau}=\frac{J_2}{6\varsigma}\left[\left(\sqrt{2\lambda_{i,v}^2-\lambda_{i,v}^{-4}}-1\right)^{-\alpha}\left(\sqrt{2\sigma_i^2/3}\right)^{\beta-1}\right]\sigma_i\lambda_{i,v}\quad \text{for } i=1,\ldots,n\,, \tag{39.1}$$

dove

$$\sigma_i=J_2\left(\frac{\lambda_{i,*}^2\lambda_{i,v}^{-2}-\lambda_{i,v}^4\lambda_{i,*}^{-4}}{J_2-2\lambda_{i,*}^2\lambda_{i,v}^{-2}-\lambda_{i,v}^4\lambda_{i,*}^{-4}+3}\right). \tag{39.2}$$

E' facile verificare che l'equazione (39) soddisfa la (37).
Le equazioni differenziali (38) e (39) consentono lo studio dell'evoluzione nel tempo del moto del vertice $h(\tau)$ dell'ICD-DEG che scaturisce a seguito dell'imposizione di opportuni profili temporali per la pressione differenziale $p(\tau)$ e la differenza di potenziale $V(\tau)$ che sono applicate tra le facce dell'ICD-DEG.
Durante tale moto, la potenza elettrica che l'ICD-DEG scambia con il circuito elettrico esterno è data dal termine a secondo membro della (36), che assume valore negativo o positivo a seconda del fatto che l'ICD-DEG stia generando o spendendo energia elettrica.
La generazione di energia elettrica richiede l'imposizione di un opportuno profilo per la $V(\tau)$ che deve essere opportunamente sincronizzato al moto $h(\tau)$. Poiché la massimizzazione dell'energia convertita dall'ICD-DEG, a parità di moto del suo vertice, avviene sottoponendo l'elastomero dielettrico a campi elettrici i più elevati possibili durante la fase di recupero della deformazione [8], il seguente ciclo di controllo è qui considerato:

1) Durante la fase di espansione da $\lambda_{\mathrm{T,low}}$ a $\lambda_{\mathrm{T,high}}$, la differenza di potenziale è mantenuta nulla ($V=0$);
2) Al raggiungimento della massima deformazione $\lambda_{\mathrm{T,high}}$, l'ICD-DEG è caricato pressoché istantaneamente al valore $V=E_{\mathrm{BD}}t_0\lambda_{\mathrm{T,high}}^{-2}$ (dove E_{BD} indica la rigidezza dielettrica del materiale);
3) Al raggiungimento della carica completa, l'ICD-DEG effettua la fase di ritorno da $\lambda_{\mathrm{T,high}}$ a $\lambda_{\mathrm{T,low}}$, durante la quale la differenza di potenziale elettrico viene comandata secondo la legge $V=E_{\mathrm{BD}}t_0\lambda_{\mathrm{T}}^{-2}$;
4) Al raggiungimento della minima deformazione $\lambda_{\mathrm{T,low}}$, l'ICD-DEG viene scaricato pressoché istantaneamente fino al valore $V=0$;
5) A scarica avvenuta, il ciclo ricomincia.

Anziché considerare un valore costante per E_{BD}, a seguito di misure sperimentali effettuate appositamente durante questo progetto, la seguente legge funzione della deformazione λ_{T} è stata adottata

$$E_{BD}=E_1\lambda_T^{\xi}, \tag{40}$$

dove ξ ed E_1 sono due costanti positive del materiale da determinarsi sperimentalmente attraverso una procedura d'interpolazione. La validità dell'equazione (40) è confermata dai risultati di Figura 8, che riporta il confronto tra i valori sperimentali della rigidezza dielettrica e la predizione del modello nel caso di un elastomero acrilico. Si noti che i valori determinati dal modello sono sempre inferiori a quelli dei dati sperimentali in quanto i valori scelti per E_{BD} devono sempre garantire all'ICD-DEG di operare in sicurezza. Ogni cerchio riportato in Figura 8 corrisponde infatti alla rottura irreversibile dell'ICD-DEG.

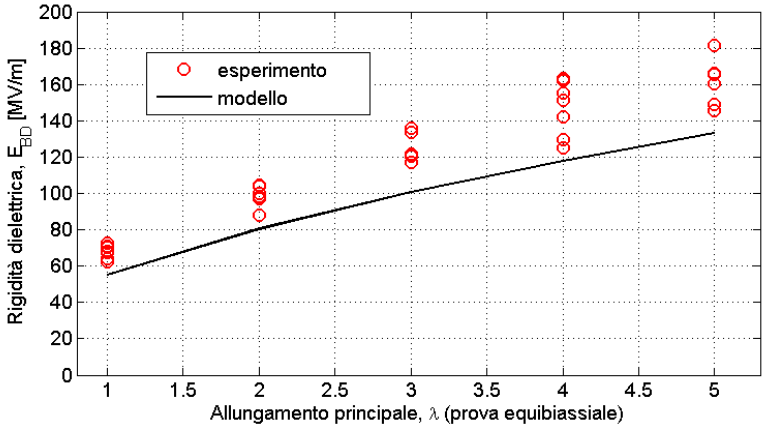


Figura 8. Validazione sperimentale del modello per la rigidità dielettrica dell'ICD-DEG: confronto tra risposta sperimentale (cerchi colorati in rosso) e modello (linea continua in nero). Materiale: elastomero acrilico. Parametri del modello: E_1 = 55 MVm^{-1}, ξ = 0.55.

Accanto alla legge per la rigidità dielettrica, la risoluzione del modello richiede anche la conoscenza della permittività elettrica ε del materiale. In disaccordo con alcuni risultati presenti in letteratura [13], a seguito di misure sperimentali effettuate appositamente durante questo progetto, un valore costante di ε è stato qui assunto. La validità di tale scelta è dimostrata in Figura 9 che riporta il caso di un elastomero acrilico.

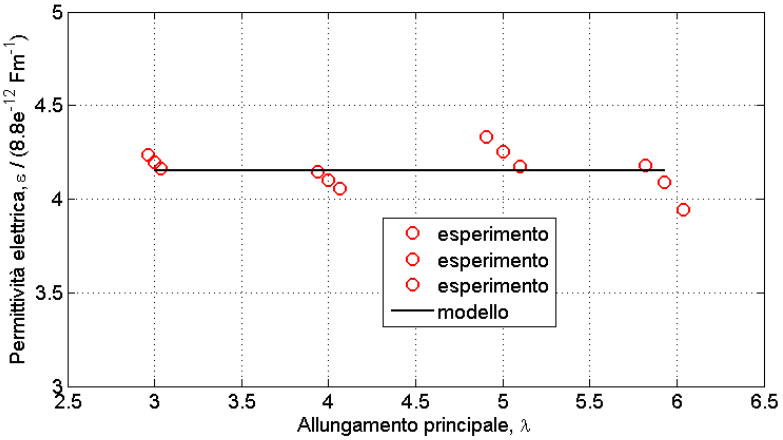


Figura 9. Validazione sperimentale per l'assunzione della costanza della permittività elettrica dell'ICD-DEG: confronto tra risposta sperimentale (cerchi colorati in rosso) e modello (linea continua in nero). Materiale: elastomero acrilico. Parametro del modello: ε = 4.15 · 8.8 pFm^{-1}.

Viste le equazioni (36) e (40), e sulla base del ciclo di generazione descritto sopra, la potenza elettrica, W_g, e l'energia in un ciclo, $U_{g,c}$, che possono essere convertite dall'ICD-DEG hanno le seguenti espressioni

$$W_g = \dot{h}\frac{V^2}{2}\frac{\partial}{\partial h}(C) = \dot{\lambda}_\mathrm{T}\frac{V^2}{2}\frac{\partial}{\partial \lambda_\mathrm{T}}(C) = \frac{\pi\varepsilon e e_0 t_0}{6}\left[E_\mathrm{BD}(\lambda_\mathrm{T})\right]^2\left(3\lambda_\mathrm{T}^{-2} + 2\frac{e}{e_0}\lambda_\mathrm{T}^{-3} + \frac{e^2}{e_0^2}\lambda_\mathrm{T}^{-4}\right)\dot{\lambda}_\mathrm{T}, \tag{41}$$

$$U_{g,c} = \int_{\lambda_{\mathrm{T,high}}}^{\lambda_{\mathrm{T,low}}}\frac{V^2}{2}\frac{\partial}{\partial \lambda_\mathrm{T}}(C)\,\mathrm{d}\lambda_\mathrm{T} = \frac{\pi\varepsilon e e_0 t_0}{6}\int_{\lambda_{\mathrm{T,high}}}^{\lambda_{\mathrm{T,low}}}\left[E_\mathrm{BD}(\lambda_\mathrm{T})\right]^2\left(3\lambda_\mathrm{T}^{-2} + 2\frac{e}{e_0}\lambda_\mathrm{T}^{-3} + \frac{e^2}{e_0^2}\lambda_\mathrm{T}^{-4}\right)\mathrm{d}\lambda_\mathrm{T}. \tag{42}$$

Infine, vista l'equazione (34), la potenza elettrica, W_d, dissipata a causa della resistività finita dell'ICD-DEG può invece essere calcolata nel modo seguente

$$W_d = V^2\int_0^{R\arcsin(e/R)}\kappa(E)\frac{2\pi r}{t}\mathrm{d}s. \tag{43}$$

Ovviamente, l'integrazione nel tempo della (43) consente poi la valutazione dell'energia elettrica dissipata in un intervallo di tempo prescritto.

La bontà del modello elettro-visco-elastico complessivo qui descritto è stata validata comparando i risultati di simulazioni numeriche con prove sperimentali effettuate su un campione di ICD-DEG (in elastomero acrilico e con dimensioni e_0 = 37mm, e = 130mm e t_0 = 1.5mm) che erano state ottenute in uno studio precedente [7]. I risultati della validazione sono riportati in Figura 10, che mostra una buona corrispondenza delle curve fornite dal modello (linea tratto-punto in magenta) e quelle ottenute per via sperimentale (linea continua in nero). Complessivamente, per valori di ampiezza e frequenza del moto del pistone compresi nei campi H = [15mm, 30mm, 45mm] e f = [0.6Hz, 0.8Hz, 1Hz, 1.2Hz], l'errore del modello elettro-viso-elastico complessivo sviluppato si attesta al di sotto del 7% per la risposta meccanica e al di sotto del 12% per la risposta elettrica.

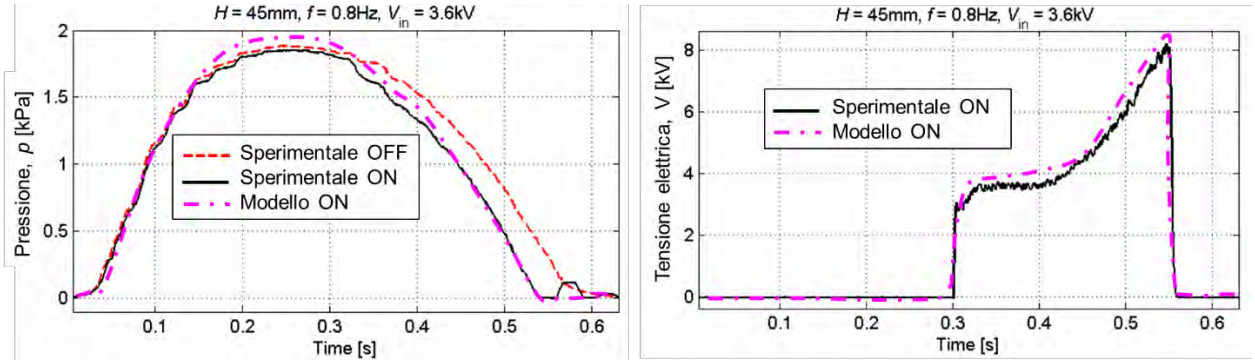


Figura 10. Validazione sperimentale del modello elettro-visco-elastico dell'ICD-DEG: confronto tra risposta sperimentale (linea continua in nero [7]) e modello (linea tratto-punto in magenta). Materiale: elastomero acrilico. Parametri del modello: μ_1 = 18 kPa; J_1 = 110; μ_2 = 42 kPa; J_2 = 55; ς = 90s^{-1}; α = 0.5; β = 3, κ_0 = 0.8 pSm^{-1}, E_0 = 47 MVm^{-1}, E_1 = 55 MVm^{-1}, ξ = 0.55, ε = 4.15 · 8.8 pFm^{-1}.

2.1.4 Accoppiamento dei sotto-modelli idrodinamico e elettro-viso-elastico

Le equazioni (1)-(3) descrivono la dinamica del pelo libero della colonna d'acqua all'interno del REWEC-GV, mentre le equazioni (38)-(43) descrivono la dinamica dell'ICD-DEG e la quantità di elettricità che può essere da esso estratta durante il ciclo di deformazione.

In questa sottosezione, tali equazioni vengono accoppiate al fine di ottenere il modello multi-fisico (da onda del mare ad elettricità) per la simulazione dell'impianto REWEC-GV equipaggiato con un PTO di tipo ICD-DEG. L'accoppiamento avviene attraverso l'equazione politropica che descrive il ciclo di compressione-espansione dell'aria contenuta tra l'ICD-DEG e la colonna d'acqua oscillante, ovvero tramite la relazione

$$p(\tau) = p(x,h) = \Pi\left[\Omega(x,h)\right]^{-\gamma}, \tag{44}$$

dove γ è l'esponente della politropica (generalmente il processo è considerate adiabatico e, dunque, γ = 1.4), Π è una costante che dipende dallo stato di pressurizzazione iniziale della camera, mentre Ω è il volume della camera, che è funzione della posizione della colonna d'acqua x e dell'altezza h del vertice dell'ICD-DEG secondo l'equazione

$$\Omega(x,h) = S(d-x) + \frac{\pi h}{6}\left(3e^2 + h^2\right), \tag{45}$$

essendo S l'area del condotto lato ICD-DEG e d la distanza della superficie di collegamento dell'ICD-DEG al REWEC-GV misurata rispetto al livello medio del pelo libero dell'acqua all'interno del condotto.

La bontà del modello multi-fisico così ottenuto è stata infine validata comparando i risultati di simulazioni numeriche con prove sperimentali ottenute in studi precedenti [4] (ICD-DEG in elastomero acrilico e con dimensioni e_0 = 25mm, e = 90mm e t_0 = 1mm). I risultati della validazione sono riportati in Figura 11, che mostra la buona corrispondenza delle curve fornite dal modello (linea tratto-punto in magenta) e quelle ottenute per via sperimentale (linea continua in blu). Complessivamente, per valori di ampiezza e frequenza dell'onda compresi nei campi H = [2cm, 3cm, 4cm] e f = [0.6Hz, 0.8Hz, 0.95Hz, 1.2Hz], l'errore del modello idro-elettro-visco-elastico complessivo si attesta al di sotto del 13% per la risposta meccanica e al di sotto del 21% per la risposta elettrica. L'incremento degli errori di predizione rispetto al caso del solo ICD-DEG è legata alle imprecisioni del modello idrodinamico che non considera le perdite dovute alla viscosità dell'acqua (dunque vorticità ecc.) e che non considera i moti secondari del pelo libero dell'acqua all'interno della colonna (effetto sloshing ecc.).

Vista la complessità di tutte le parti in gioco, errori di predizione di questo ordine possono essere considerati più che accettabili ed in linea con le pratiche di stima esistenti nel settore dell'energia dalle onde del mare [9].

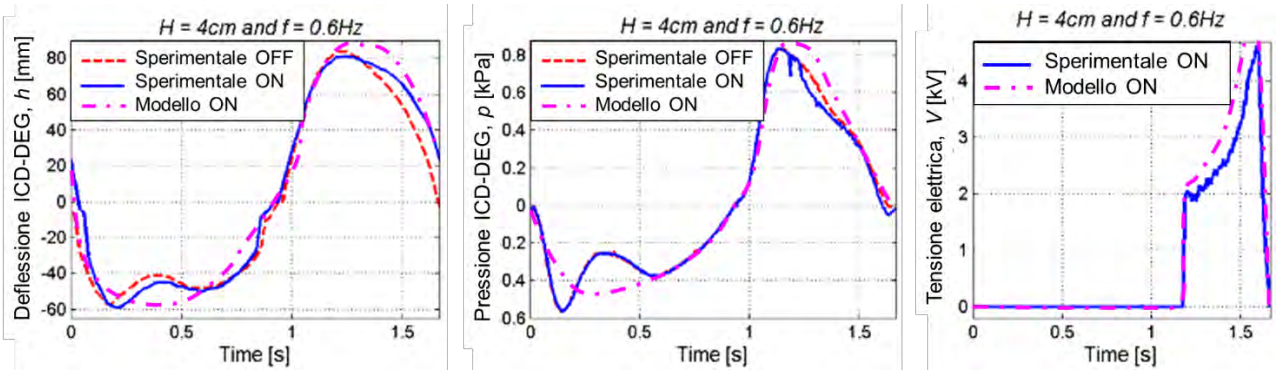


Figura 11. Validazione sperimentale del modello fluido-elettro-visco-elastico di un impianto (in scala 1:50) a colonna d'acqua oscillante (OWC) equipaggiato da un ICD-DEG PTO: confronto tra risposta sperimentale (linea continua in blu [4]) e modello completo (linea tratto-punto in magenta).
Materiale: elastomero acrilico. Parametri del modello: μ_1 = 18 kPa; J_1 = 110; μ_2 = 42 kPa; J_2 = 55; ς = 90s^{-1}; α = 0.5; β = 3, κ_0 = 0.8 pSm^{-1}, E_0 = 47 MVm^{-1}, E_1 = 55 MVm^{-1}, ξ = 0.55, ε = 4.15 · 8.8 pFm^{-1}.

2.2 *Applicazione del modello multi-fisico allo studio di un ICD-DEG PTO per cassone REWEC-GV*

Questa sezione riporta i risultati relativi al dimensionamento di un ICD-DEG PTO per il cassone REWEC-GV la cui geometria e dimensioni sono mostrate in Figura 2. In accordo con [14], la lunghezza globale del cassone nella direzione perpendicolare alla direzione nominale di propagazione dell'onda è stata scelta pari a 6.6 m.
Il dimensionamento è stato effettuato utilizzando il modello multi-fisico descritto alla sezione 2.1, secondo la procedura dettagliata di seguito.
L'attività iniziale si è occupata dell'individuazione degli stati di mare di progetto. In accordo con i dati ondosi rilevati nel sito del laboratorio NOEL di Reggio Calabria, sono stati presi in considerazione stati di mare con periodo di picco T_p compreso tra 1.8s e 3s e altezze significative H_s comprese tra 0.2m e 0.6m. In accordo con studi precedenti [14] e come descritto alla sezione 2.1.2, i profili della forza di eccitazione sono stati generati assumendo uno spettro del tipo Joanswap.
Successivamente, una campagna di simulazioni è stata condotta per la definizione delle dimensioni e del materiale da utilizzarsi per l'ICD-DEG. In particolare, l'ottimizzazione è stata effettuata per mezzo di una procedura iterativa che ha considerato tutte le soluzioni ottenibili dalla combinazione di:

- Tre tipi differenti di materiale: gomma naturale, elastomero acrilico, elastomero siliconico;
- Valori del raggio, e, dell'ICD-DEG nella configurazione di montaggio compresi tra 0.2m e 0.4m (con passo di 0.02m);
- Valori del raggio, e_0, dell'ICD-DEG nella configurazione indeformata compresi tra $0.25{\cdot}e$ e $0.8{\cdot}e$ (con passo di $0.05\cdot e$);
- Valori dello spessore, t_0, dell'ICD-DEG nella configurazione indeformata compresi tra 0.5cm e 5cm (con passo di 0.05cm).

La soluzione ottimale identificata prevede che il PTO per il cassone REWEC-GV sia costituito da quattro ICD-DEG distinti realizzati in elastomero siliconico, caratterizzato dai parametri costitutivi riportati in Tabella 1, e aventi le dimensioni descritte in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**.

μ_1 (kPa)	J_1	μ_2 (kPa)	J_1	ς (s^{-1})	α	β	κ_0	E_0 (MV/m)	E_1 (MV/m)	ξ	ε (pF/m)
30	197	63	197	3	0.95	2.2	0.25	70.3	61	0.31	7·8.8e

Tabella 1. Costanti costitutive per l'elastomero siliconico considerato per l'ottimizzazione dell'ICD-DEG.

Raggio (config. indeformata)	e_0	0.114 m
Raggio (config. montaggio)	e	0.4 m
Spessore (config. indeformata)	t_0	2.45 cm

Tabella 2. Caratteristiche dimensionali dell'ICD-DEG in elastomero siliconico da accoppiare al cassone REWEC-GV.

Le prestazioni del sistema risultante sono descritte in Figura 12, che mostra la matrice di potenza e quella dei fattori di assorbimento (definiti come il rapporto tra la potenza di output dell'impianto e la potenza trasportata dall'onda incidente in un fronte avente la stessa lunghezza del cassone REWEC-GV considerato), ottenute per agli stati di mare di progetto.

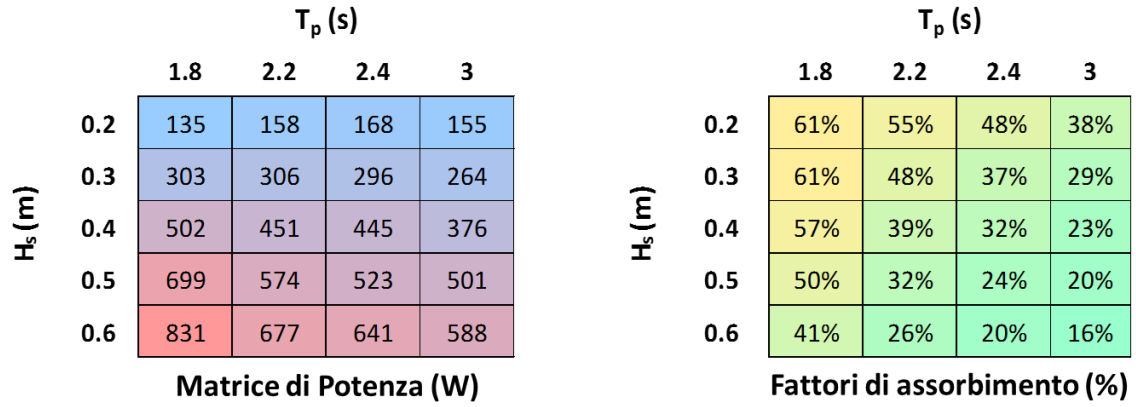


Figura 12. Matrici di potenza e dei fattori di assorbimento stimate per l'impianto REWEC-GV equipaggiato con quattro ICD-DEG PTO.

Come è possibile notare dai valori ottenuti, il REWEC-GV con PTO di tipo ICD-DEG risulta meglio accordato con stati di mare aventi periodi di picco bassi. Ciò è facilmente spiegato alla luce della presenza della membrana, che contribuisce alla dinamica del sistema oltre che con lo smorzamento legato all'energia rimossa, con un contributo di rigidezza che è dovuto all'elasticità intrinseca dell'elastomero dielettrico. In altre parole, la membrana apporta al sistema un ulteriore addendo di rigidezza, che va a combinarsi con la rigidezza idrostatica della colonna d'acqua e provoca un aumento della frequenza naturale del dispositivo.

3 Conclusioni

Questo lavoro ha affrontato lo studio di fattibilità di un nuovo sistema di power-take-off (PTO), di tipo polimerico e basato su generatori ad elastomero dielettrico (DEG), per il convertitore dell'energia dalle onde del mare REWEC-GV installato presso il Laboratorio NOEL dell'Università di Reggio Calabria.
Il DEG considerato ha la forma di un diaframma circolare gonfiabile ed è pensato per essere installato a chiusura dell'apertura che sovrasta la camera d'aria del REWEC-GV in sostituzione del tradizionale PTO basato su turbo-generatore.
I principali risultati raggiunti dallo studio sono i seguenti:

- Le leggi costitutive necessarie per la rappresentazione del comportamento elettromeccanico degli elastomeri dielettrici sono state definite attraverso una campagna di test sperimentali condotte su un elastomero acrilico.
- Grazie alla definizione delle leggi costitutive di cui sopra, un nuovo modello dissipativo per il DEG a diaframma circolare gonfiabile è stato predisposto che consente di catturare con un buon livello di dettaglio (ovvero con un'accuratezza di circa il 90% rispetto ai dati sperimentali) l'intero processo di conversione che trasforma l'energia pneumatica della camera d'aria del REWEC-GV in elettricità.
- Grazie all'accoppiamento del modello del DEG di cui sopra con quello idrodinamico di un interfaccia primaria a colonna d'acqua oscillante (OWC), un nuovo modello multi-fisico (da onda a rete elettrica) è stato predisposto che consente di catturare con un buon livello di dettaglio (ovvero con un'accuratezza intorno al 80% rispetto ai dati sperimentali) le prestazioni complessive di impianti OWC equipaggiati con PTO del tipo DEG a diaframma circolare gonfiabile.
- Applicazione del modello multi-fisico allo studio di un PTO del tipo DEG a diaframma circolare gonfiabile per il cassone REWEC-GV che è installato presso il Laboratorio NOEL dell'Università di Reggio Calabria ha confermato la preliminare fattibilità e validità della soluzione proposta.

E' bene osservare che, ad oggi, le uniche esecuzioni prototipali di DEG riguardano sistemi di piccola dimensione (in particolare, diaframmi circolari di circa 250mm di diametro e 0.1mm di spessore). Nonostante la disponibilità di tutta la componentistica e delle tecniche di manifattura necessarie, la realizzazione di DEG aventi le dimensioni indicate in questo studio deve essere ancora dimostrata e deve essere uno degli obiettivi principali degli studi a venire al fine di verificare e, nel caso, identificare eventuali problemi di scalabilità della tecnologia.
Una ulteriore tematica che deve essere affrontata quanto prima riguarda lo studio della vita a fatica dei DEG sottoposti a sollecitazioni cicliche miste di natura sia meccanica che elettrica. La comprensione di quest'ultimo aspetto è infatti di fondamentale importanza per la progettazione di sistemi reali che devono trovare un compromesso tra prestazioni massime e durata.

4 Riferimenti bibliografici

1. F. Carpi, D. De Rossi, R. Kornbluh, R. Pelrine, P. Sommer-Larsen, "Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers: Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology, 2008, Elsevier.
2. S. Chiba, M. Waki, R. Kornbluh, R. Pelrine, "Innovative power generators for energy harvesting using electroactive polymer artificial muscles", Proc. SPIE vol. 6927, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), San Diego, 2008, pp. 692715.
3. P. Jean, A. Wattez, G. Ardoise, C. Melis, R. Van Kessel, A. Fourmon, E. Barrabino, J. Heemskerk, J. P. Queau, "Standing wave tube electro active polymer wave energy converter", Proc. SPIE vol. 8340, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), San Diego, 2012, pp. 83400C.
4. R. Vertechy, M. Fontana, G.P. Rosati Papini, D. Forehand, "In-tank tests of a dielectric elastomer generator for wave energy harvesting", Proc. SPIE vol. 9056, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), San Diego, 2014, pp. 90561G-90561G.
5. B. Teillant, M. Vicente, G. P. Rosati Papini, G. Moretti, R. Vertechy, M. Fontana, K. Monk, M. Alves, "Techno-economic comparison between air turbines and dielectric elastomer generators as power take off for oscillating water column wave energy converters", Proc. of the 11th European Wave and Tidal Energy ConferenceEWTEC2015, Nantes, 7-10 September 2015.
6. R. Vertechy, M. Fontana, "Reduced Model and Application of Inflating Circular Diaphragm Dielectric Elastomer Generators for Wave Energy Harvesting", ASME Journal of Vibration and Acoustics, vol. 137(2015), pp. 011004.
7. M. Righi, R. Vertechy, M. Fontana, "Experimental Characterization of a Circular Diaphragm Dielectric Elastomer Generator", Proc. of ASME 2014 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems (SMASIS-2014), paper n. SMASIS2014-7481, Newport (RI), September 8–10 2014.
8. S.J.A. Koh, C. Keplinger, T. Li, S. Bauer, Z. Suo, "Dielectric elastomer generators: How much energy can be converted?", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 16(2011), pp. 33-41.
9. M. Folley, A. Babarit, B. Child, D. Forehand, L. O'Boyle, K. Silverthorne, P. Troch, "A review of numerical modelling of wave energy converter arrays", Proc. of ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2012, pp. 535-545.
10. G. Moretti, G. P. Papini Rosati, M. Alves, M. Grase, R. Vertechy, M. Fontana, "Analysis And Design Of An Oscillating Water Column Wave Energy Converter With Dielectric Elastomer Power Take-Off", Proc. of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, May 31-June 5, 2015, St. John's, paper n. OMAE2015-42103.
11. T. Pérez, T. I. Fossen, T., "Time-vs. frequency-domain identification of parametric radiation force models for marine structures at zero speed", Modeling, Identification and Control, 29(2008), pp. 1-19.
12. S. Govindjee, S. Reese S., "A presentation and comparison of two large deformation viscoelasticity models", Journal of Engineering Materials and Technology, 119(1997), pp. 251-255.
13. G. Kofod, P. Sommer-Larsen, R. Kornbluh, R. Pelrine, R., "Actuation response of polyacrylate dielectric elastomers", Journal of intelligent material systems and structures, vol. 14(2003), pp. 787-793.
14. F. Arena, V. Laface, G. Malara, A. Romolo, A. Viviano, "Ottimizzazione di dispositivi U-OWC (U-Oscillating Water Column) e progettazione di test sperimentali", Enea, Ricerca di Sistema Elettrico, 2013.

Descrizione del Dipartimento di Ingegneria Industriale e del Gruppo di Robotica dell'Università di Bologna che ha condotto la ricerca:

Il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN) dell'Università di Bologna svolge attività di ricerca e di formazione nei seguenti ambiti dell'ingegneria: meccanica, energetica, gestionale, aerospaziale, biomeccanica, nucleare, dei materiali, dell'automazione e della fisica tecnica.

Tra i primi in Italia, il Gruppo di Robotica del DIN è attivo nell'ambito della ricerca sui trasduttori ad elastomero dielettrico (e polimeri elettro/magneto-attivi in genere) dal 2003, specializzandosi sui seguenti aspetti: caratterizzazione sperimentale, modellazione e simulazione numerica di materiali e di dispositivi; progettazione, realizzazione, test e controllo di dispositivi. Queste attività di ricerca, nate da un progetto congiunto con la Stanford University (dal 2003 al 2005), sono condotte principalmente dal Prof. Rocco Vertechy e sono orientate all'impiego di tali trasduttori polimerici sia come attuatori compatti e leggeri per dispositivi robotici/meccatronici sia come generatori ad alta efficienza e a basso costo per la produzione di elettricità da fonte rinnovabile (attività svolta in collaborazione col Dott. M. Fontana del Centro SEES della Scuola Superiore Sant'Anna).

Il Gruppo di Robotica del DIN unitamente al Centro SEES sella Scuola Superiore Sant'Anna sono attualmente tra i laboratori più attivi al mondo sul tema dei generatori ad elastomero dielettrico.