

Application Note AN-EIS-003

Spettroscopia di impedenza elettrochimica

Parte 3 – Analisi dei dati

La caratterizzazione dei sistemi elettrochimici mediante spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS) richiede modelli adeguati per l'interpretazione dei dati. Questi modelli possono essere suddivisi in due grandi categorie: modelli di circuito equivalente e modelli di processo. I modelli vengono sottoposti a regressione ai dati sperimentali per stimare parametri che possano descrivere adeguatamente i dati sperimentali e essere utilizzati per prevedere il comportamento del sistema in diverse condizioni.

Questa serie in sette parti introduce il concetto e i fondamenti dell'EIS, insieme a configurazioni sperimentali, circuiti equivalenti comuni utilizzati per l'adattamento dei dati e suggerimenti per migliorare la qualità dei dati misurati e dell'adattamento. Questa Application Note (parte 3) introduce gli elementi circuituali più comuni che possono essere assemblati in diverse configurazioni per ottenere circuiti equivalenti utilizzati per l'analisi dei dati.

MODELLI DI CIRCUITI EQUIVALENTI

È possibile rappresentare celle elettrochimiche complete, così come singoli processi fisici e chimici, come un insieme di elementi elettrici di base come resistori o condensatori. Insiemi di tali elementi possono essere combinati in serie e in parallelo per costruire quello che viene definito un modello di circuito equivalente.

Come ogni singolo elemento elettrico, ogni processo nella cella elettrochimica ha una diversa risposta in

frequenza e quindi una diversa impedenza. Questi modelli rappresentano il modo più comune per interpretare i dati di impedenza raccolti durante una tipica misurazione EIS.

Le sezioni seguenti descrivono ciascun elemento comunemente utilizzato per costruire un circuito equivalente, insieme ad esempi del suo equivalente reale (elettrochimico).

RESISTORE, R

Un resistore R ha un'impedenza Z_R di:

$$Z_R (\Omega) = R$$

$$|Z_R| (\Omega) = R$$

$$\theta_R (^\circ) = 0$$

L'impedenza è indipendente dalla frequenza e non ha parte immaginaria. La corrente che attraversa un resistore è sempre in fase con la tensione, quindi non è presente alcuno sfasamento. In NOVA, l'elemento R è rappresentato dal simbolo mostrato in alto al centro

della **Figura 1**.

Alcuni esempi dell'uso di un resistore per descrivere fenomeni elettrochimici sono la resistenza ohmica e la resistenza di polarizzazione. Questi saranno descritti più dettagliatamente nelle sezioni successive.

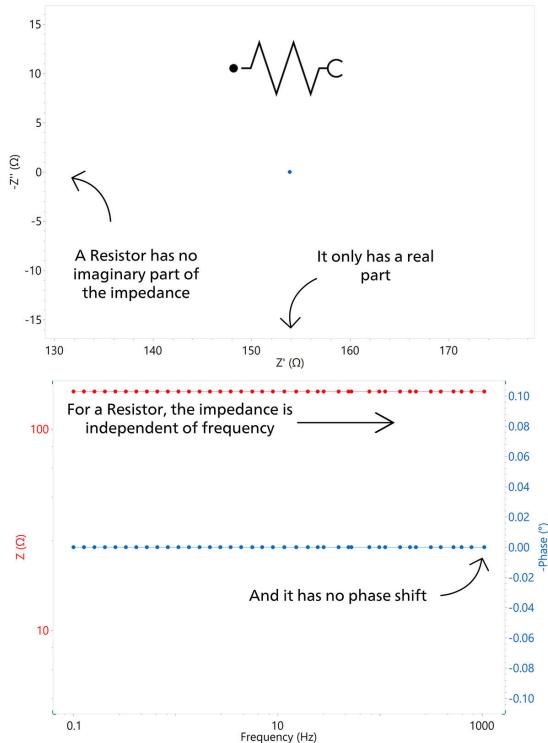


Figure 1. Diagrammi di Nyquist (in alto) e di Bode (in basso) per l'elemento resistore (R) e il simbolo associato in NOVA (intarsio in alto al centro).

Resistenza ohmica, R_Ω

La caduta di potenziale tra l'elettrodo di riferimento e l'elettrodo di lavoro è la resistenza ohmica (nota anche come resistenza non compensata) e può essere

modellata utilizzando R. La resistenza ohmica dipende dalla condutività dell'elettrolita e dalla geometria dell'elettrodo. Per un elettrodo a disco rotante, la resistenza ohmica è data dalla seguente equazione:

$$R_\Omega = \frac{1}{4\kappa r}$$

dove κ (S cm^{-1}) è la conduttività specifica dell'elettrolita in massa e r (cm) è il raggio del disco. Per geometrie più complesse, la resistenza ohmica viene determinata sperimentalmente e può essere stimata tramite EIS. In un diagramma di Nyquist, l'intersezione dei dati di impedenza con la parte reale dell'asse all'estremità ad alta frequenza fornisce la resistenza ohmica.

Resistenza alla polarizzazione, R_p

Un elettrodo è polarizzato quando il suo potenziale viene forzato ad allontanarsi dal suo valore a circuito aperto. La polarizzazione di un elettrodo provoca il flusso di corrente dovuto alle reazioni elettrochimiche che induce sulla superficie dell'elettrodo. L'intensità

della corrente è controllata dalla cinetica di reazione e dalla diffusione dei reagenti sia verso l'elettrodo che lontano da esso.

Ad esempio, quando un elettrodo subisce una corrosione uniforme a circuito aperto, il potenziale a circuito aperto (OCP) è controllato dall'equilibrio tra reazioni anodiche e catodiche, che determina correnti anodiche e catodiche. L'OCP è il potenziale in cui le due correnti sono uguali. Il valore della corrente per ciascuna delle due reazioni è noto come corrente di corrosione. Quando le due reazioni sono sotto controllo cinetico, il potenziale della cella può essere correlato alla corrente tramite l'equazione di Butler-Volmer:

$$i = i_0 (e^{2.303 \frac{\eta}{\beta_a}} - e^{-2.303 \frac{\eta}{\beta_c}})$$

dove i (A) è la corrente di cella misurata, i_0 (A) è la corrente di scambio, 2.303 è la conversione tra \log_e e \log_{10} , η (V) è la sovratensione (definita come la differenza tra il potenziale applicato E e il potenziale

di corrosione E_{corr}), e β_a (V) e β_c (V) sono le pendenze di Tafel rispettivamente del ramo anodico e catodico.

Per il sovrapotenziale η , quanto sopra può essere trasformato in:

$$i_0 \approx \frac{1}{R_p} \left[\frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \right]$$

La resistenza di polarizzazione R_p si comporta come un resistore. Se le pendenze di Tafel sono note, allora i_0 può essere calcolato da R_p . La corrente di scambio i_0

può quindi essere utilizzata per calcolare la velocità di corrosione (vedi [AN-COR-002](#)).

CONDENSATORE, C

Un condensatore C ha un'impedenza di:

$$Z_c(\Omega) = -\frac{1}{j\omega C}$$

$$|Z_c|(\Omega) = \frac{1}{\omega C}$$

$$\theta_C(^{\circ}) = 90$$

dove $j = \sqrt{-1}$, la frequenza angolare $\omega = 2\pi f$, e C (F) è la capacità.

L'impedenza dei condensatori è funzione della frequenza e ha solo una parte immaginaria. L'impedenza di un condensatore diminuisce

all'aumentare della frequenza. La corrente che attraversa un condensatore è sfasata di 90° rispetto alla tensione. In NOVA, l'elemento C è rappresentato dal simbolo in [Figura 2](#).

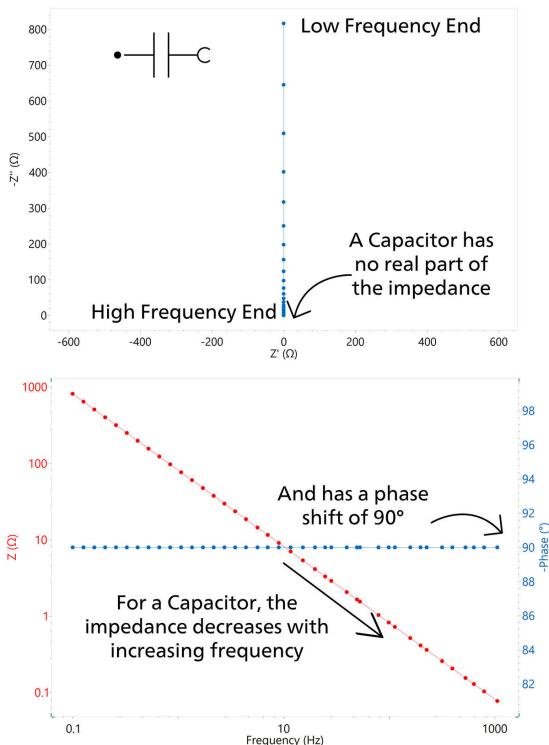


Figure 2. Diagrammi di Nyquist (in alto) e di Bode (in basso) per un condensatore (C) e il simbolo associato in NOVA (intarsio nell'angolo in alto a sinistra).

Di seguito sono riportati alcuni esempi dell'uso del condensatore per descrivere fenomeni elettrochimici.

Capacità a doppio strato, C_{DL}

All'interfaccia elettrodo/elettrolita si forma un doppio strato elettrico. Questo doppio strato si forma quando gli ioni della soluzione si avvicinano alla superficie dell'elettrodo. Le cariche dell'elettrodo vengono separate dalle cariche di questi ioni. La separazione è dell'ordine degli Angstrom.

Il valore della capacità del doppio strato dipende da

molte variabili, tra cui il potenziale dell'elettrodo, la temperatura, le concentrazioni ioniche, i tipi di ioni, gli strati di ossido, la rugosità dell'elettrodo, l'adsorbimento delle impurità e altro ancora. Per gli elettrodi metallici, i valori tipici della capacità del doppio strato sono compresi tra $10\text{--}20 \mu\text{F cm}^{-2}$.

Capacità di rivestimento, C_C

Per i substrati rivestiti in polimero, la capacità del rivestimento C_C è data dall'equazione:

$$C_c = \epsilon_0 \epsilon \frac{A}{d}$$

dove ϵ_0 ($8.85E - 12 \text{ F m}^{-1}$) è la permittività del vuoto, ϵ è la permittività relativa del rivestimento, A (m^2) è l'area del rivestimento e d (m) è lo spessore del rivestimento.

I valori tipici di permittività relativa dei rivestimenti variano tra 3 e 4, mentre la permittività relativa dell'acqua è di circa 80. Quando l'acqua penetra nel

rivestimento, la sua costante dielettrica aumenta, con conseguente aumento della capacità del rivestimento. Pertanto, C_c può essere utilizzato per misurare la quantità di acqua assorbita dal rivestimento. Pertanto, l'EIS è una tecnica utile per monitorare le variazioni nei rivestimenti.

INDUTTORE, L

L'impedenza di un induttore L è data dall'equazione:

$$Z_L (\Omega) = j\omega L$$

$$|Z_L| (\Omega) = \omega L$$

$$\theta_L (\circ) = -90$$

dove $j = \sqrt{-1}$, la frequenza angolare $\omega = 2\pi f$, e L (H) è l'induttanza.

L'impedenza di un induttore aumenta con la frequenza. Come i condensatori, gli induttori hanno

solo una componente di impedenza immaginaria. Tuttavia, la corrente che attraversa un induttore è sfasata di -90° rispetto alla tensione.

L'impedenza di una cella elettrochimica può talvolta

apparire induttiva a causa dell'adsorbimento dei reagenti sulla superficie e può essere modellata utilizzando l'induttanza (solitamente a basse frequenze).

Il comportamento induttivo può anche derivare da una distribuzione non uniforme della corrente, dall'induttanza dei cavi delle celle, dalla lenta risposta

degli elettrodi di riferimento e da non idealità del potenziostato. In questi casi, la comparsa di induttanza ad alte frequenze può indicare un artefatto, un errore o una non idealità nella misurazione EIS. In NOVA, l'elemento L è rappresentato dal simbolo mostrato in **Figura 3**.

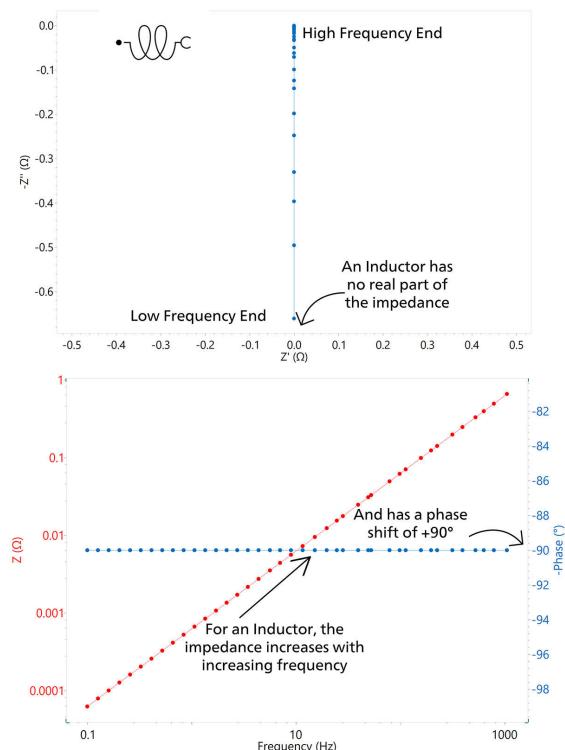


Figura 3. Diagrammi di Nyquist (in alto) e di Bode (in basso) per un induttore (L) e il simbolo associato in NOVA (intarsio nell'angolo in alto a sinistra).

ELEMENTO A FASE COSTANTE, Q (O CPE)

La modellazione di un fenomeno elettrochimico con un condensatore ideale presuppone che la superficie in esame sia omogenea, il che normalmente non avviene.

Questa mancanza di omogeneità è modellata con un elemento Q, utilizzato per rappresentare l'elemento a fase costante (CPE):

$$Z_Q(\Omega) = \frac{1}{Y_0(j\omega)^n}$$

$$|Z_Q|(\Omega) = \frac{1}{Y_0 \omega^n}$$

$$\theta_Q(^{\circ}) = 90 - \alpha$$

dove Y_0 ($S \cdot s^n$) è il parametro contenente le informazioni sulla capacità, $j = 1$, (la frequenza angolare) è uguale a $2f$, n è una costante empirica che varia da 0 a 1 relativa alla deviazione della linea retta capacitiva da 90° , e è l'angolo di deviazione definito come $= 90^{\circ} (1 - n)$.

È interessante notare che quando $n = 1$, il CPE si

comporta come un condensatore puro, mentre quando $n = 0$, il CPE si comporta come un resistore puro. Inoltre, quando $n = 0.5$, il CPE è l'equivalente del cosiddetto elemento di Warburg, descritto nelle sezioni seguenti.

In NOVA, l'elemento Q è rappresentato dal simbolo mostrato nella **Figura 4**.

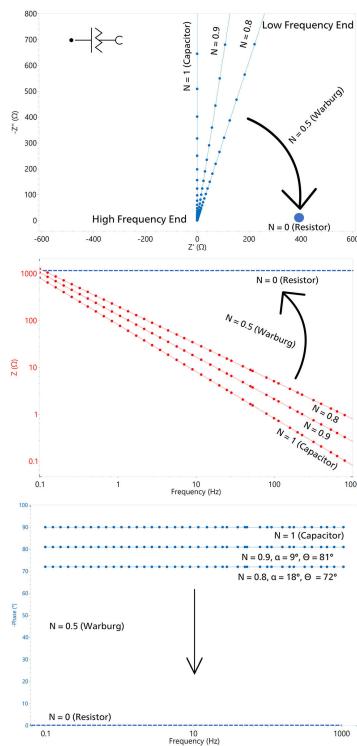


Figure 4. Diagrammi di Nyquist (in alto) e di Bode (in basso) per un elemento a fase costante (CPE) e il simbolo associato in NOVA (inserto nell'angolo in alto a sinistra).

Note: In queste equazioni (e in NOVA), l'impedenza è definita in termini di ammettenza. Mentre l'impedenza di un materiale è una misura di quanto la corrente alternata è impedita in un circuito, l'ammettenza è una misura di quanta corrente viene ammessa. Pertanto, possiamo considerare che l'ammettenza sia il reciproco (inverso)

dell'impedenza. In NOVA, le unità di Y_0 sono espresse come $\text{Mho} \cdot \text{s}^N$. Ciò equivale a dire ($\text{S} \cdot \text{s}^N$) come $\text{S} (\text{Siemens}) = \text{Mho}$.

La capacità del doppio strato e la capacità del rivestimento, descritte nella sezione precedente, vengono solitamente modellate con un CPE.

MODELLOAZIONE DELLA DIFFUSIONE NEI SISTEMI ELETTROCHIMICI

In elettrochimica, lo strato di diffusione è la regione prossima alla superficie dell'elettrodo in cui la concentrazione di materiali elettroattivi varia a causa della diffusione di tali materiali verso o dalla superficie dell'elettrodo. Svolge un ruolo in quasi tutti i processi elettrochimici. Pertanto, tecniche elettrochimiche più "tradizionali" come la voltammetria ciclica e la cronoamperometria vengono spesso impiegate per studiare la kinetica delle reazioni e l'impatto delle proprietà dello strato di diffusione su di esse. Pertanto, per costruire un modello accurato dell'interfaccia elettrochimica è importante modellare in modo indipendente il processo di diffusione in atto. A questo scopo sono stati sviluppati diversi elementi circuitali, tra cui il

Warburg (W), il Warburg corto (O), il Warburg aperto (T) e la linea di trasmissione (nota anche come Bisquert, B2). Le circostanze in cui un elemento dovrebbe essere scelto rispetto all'altro saranno spiegate nelle sezioni successive.

Warburg, W: diffusione semi-infinita

L'elemento più semplice (e più comunemente utilizzato) per modellare il comportamento della diffusione, l'elemento di Warburg, descrive cosa accade quando si verifica una diffusione lineare verso un elettrodo planare di grandi dimensioni (ad esempio, cosa accade in una cella tradizionale a tre elettrodi). In base a questa ipotesi di uno strato di diffusione lineare semi-infinito, l'impedenza è definita come:

$$Z_w (\Omega) = \frac{1}{Y_0 \sqrt{j\omega}} = \frac{\sqrt{2}}{Y_0 \sqrt{\omega}} - j \frac{\sqrt{2}}{Y_0 \sqrt{\omega}}$$

$$|Z_w| (\Omega) = \frac{2}{Y_0 \sqrt{\omega}}$$

$$\theta_W (\circ) = 45$$

dove $j = 1$, (la frequenza angolare) è uguale a $2f$, and Y_0 ($F \text{ s}^{-1/2}$) è un parametro contenente informazioni sulla diffusione.

Il reciproco di questo è noto come coefficiente di Warburg, solitamente indicato con il simbolo nella

letteratura scientifica. Quando si ha a che fare con un sistema redox (quasi)reversibile in cui sia la forma ossidata che quella ridotta sono solubili in soluzione, il coefficiente di Warburg è correlato alla diffusione delle forme disciolte dall'equazione:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{1}{Y_0} = \frac{RT}{AF^2 n^2 \sqrt{2}} \left(\frac{1}{C_O^b \sqrt{D_O}} + \frac{1}{C_R^b \sqrt{D_R}} \right) \\ &= \frac{RT}{AF^2 n^2 \theta C^b \sqrt{2D}}\end{aligned}$$

dove R , T , e F hanno le loro definizioni usuali, n è il numero di elettroni scambiati, D è il coefficiente di diffusione della specie (dove gli indici O e R sindicano rispettivamente le specie ossidate e ridotte), C^b è a concentrazione delle specie O e R nella massa, A è l'area superficiale e θ indica la

frazione delle specie O e R presenti.

Un'impedenza di Warburg è caratterizzata dall'avere contributi reali e immaginari identici, con conseguente angolo di fase di 45° . In NOVA, l'elemento di Warburg è rappresentato dal simbolo in **Figura 5**.

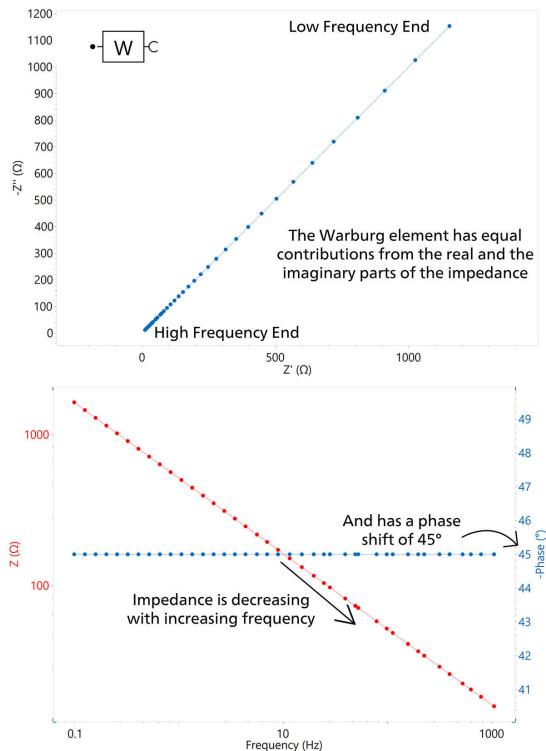


Figure 5. Diagrammi di Nyquist (in alto) e di Bode (in basso) per un elemento di Warburg (W) e il simbolo associato in NOVA (inserto nell'angolo in alto a sinistra).

Warburg – terminale di cortocircuito, O: diffusione finita

A titolo di riferimento, il terminale di cortocircuito di Warburg (chiamato semplicemente "Warburg short") è noto anche in NOVA come iperbolico cotangente. È anche noto come FLW (Warburg di lunghezza finita) o elemento di diffusione finito trasmissivo in

altre parti della letteratura scientifica.

This element is most associated with diffusion through a layer of finite thickness that ends in a transmissive (permeable) boundary. Under the assumption of a finite diffusion layer thickness (Nernst hypothesis) with a short circuit terminus, the diffusion impedance is modelled by:

MODELLAZIONE DELLA DIFFUSIONE NEI SISTEMI ELETROCHIMICI

$$Z_0 (\Omega) = \frac{1}{Y_0 \sqrt{j\omega}} \coth(B \sqrt{j\omega})$$

dove, Y_0 (S s) è il parametro contenente informazioni sulla diffusione, $j = 1$, (la frequenza

angolare) è uguale a $2f$, e B (s) è dato dall'equazione:

$$B = \frac{\delta}{\sqrt{D}}$$

dove (cm) è lo spessore dello strato di diffusione e D ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$) è il coefficiente di diffusione. È interessante notare che quando B è grande, Z_0 si riduce a Z_W .

Un classico esempio pratico di quando utilizzare

l'elemento corto di Warburg è descrivere la diffusione in un elettrodo a disco rotante, dove attraverso la convezione forzata, lo strato di diffusione ha uno spessore finito dato da:

$$\delta = \frac{1.61 \cdot D^{1/3} u^{1/6}}{\sqrt{\omega_{RDE}}}$$

dove D ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$) è il coefficiente di diffusione, u ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$) è la viscosità cinematica della soluzione e ω_{RDE} (rad s^{-1}) è la frequenza angolare dell'elettrodo a disco

rotante. In NOVA, l'elemento terminale di cortocircuito di Warburg è rappresentato dal simbolo in Figura 6.

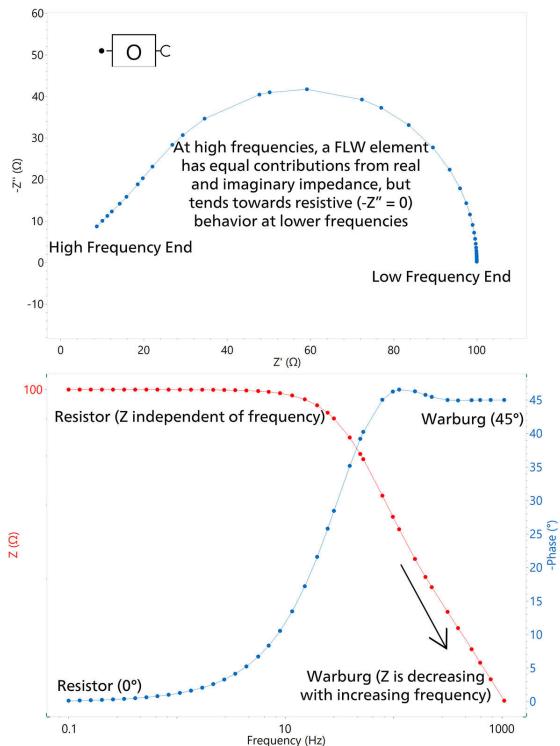


Figure 6. Diagrammi di Nyquist (in alto) e di Bode (in basso) per un elemento di Warburg di lunghezza finita (O) e il simbolo associato in NOVA (inserto nell'angolo in alto a sinistra).

MODELLOZIONE DELLA DIFFUSIONE NEI SISTEMI ELETROCHIMICI

Come mostrato nel diagramma di Nyquist in **Figura 6**, alle alte frequenze l'elemento corto di Warburg si comporta come un tipico elemento Warburg con un angolo di fase di 45°. A frequenze più basse, il corto di Warburg si comporta più come un resistore con l'impedenza che tende verso l'asse Z' , producendo un semicerchio nella regione delle basse frequenze. Questo si riflette nel diagramma di Bode, che alle basse frequenze (circa 10 Hz) mostra l'impedenza che diventa indipendente dalla frequenza (comportamento tipico di un resistore). A frequenze più alte, tuttavia, l'impedenza è più simile a quella di un condensatore, poiché l'impedenza inizia a diminuire con l'aumentare della frequenza. Mentre il diagramma di Bode mostra che alle basse frequenze l'impedenza (che si comporta principalmente come un resistore) diventa indipendente dalla frequenza e alle frequenze più alte assume un carattere più capacitivo, l'impedenza inizia a diminuire con

l'aumentare della frequenza. L'angolo di fase è di 0° alle basse frequenze (R) e di 45° alle alte frequenze (W).

Warburg – terminale a circuito aperto, T: diffusione finita

Per riferimento, il terminale del circuito aperto di Warburg (chiamato semplicemente "Warburg open") è noto anche in NOVA come iperbolico tangente. Altrove nella letteratura scientifica è noto come FSW (Warburg in spazio finito), o elemento di diffusione finito riflettente.

Questo elemento è maggiormente associato alla diffusione attraverso uno strato di spessore finito che termina in un confine riflettente (impermeabile). Assumendo uno spessore finito dello strato di diffusione (ipotesi di Nernst) con un terminale a circuito aperto, l'impedenza di diffusione è modellata da:

$$Z_0 (\Omega) = \frac{1}{Y_0 \sqrt{j\omega}} \tanh(B \sqrt{j\omega})$$

dove Y_0 ($S \sqrt{s}$) è il parametro contenente informazioni sulla diffusione, $j = \sqrt{-1}$, a frequenza angolare $\omega = 2\pi f$,

e B (\sqrt{s}) è dato da:

$$B = \frac{\delta}{\sqrt{D}}$$

dove δ (cm) è lo spessore dello strato di diffusione e D ($cm^2 s^{-1}$) è il coefficiente di diffusione.

Per un esempio concreto, l'elemento aperto di Warburg dovrebbe essere utilizzato per modellare la diffusione finita di specie attraverso una pellicola sottile (ad esempio, attraverso un polimero conduttivo depositato su una superficie metallica), elettrodi porosi (ad esempio, l'elemento Bisquert, B2) o la diffusione di ioni all'interno di un elettrodo di accumulo come nelle batterie agli ioni di litio.

In NOVA, l'elemento terminale a circuito aperto di Warburg è rappresentato dal simbolo in **Figura 7**.

Come l'elemento corto di Warburg, alle alte frequenze il Warburg aperto si comporta come un elemento Warburg tradizionale con un angolo di fase di 45°. A frequenze più basse, l'elemento tende a un comportamento più capacitivo con solo un contributo immaginario (**Figura 7**). Il diagramma di Bode mostra che l'impedenza diminuisce all'aumentare della frequenza e l'angolo di fase è di 45° alle alte frequenze, dove domina la componente W . Inizia a salire una volta raggiunta la regione delle basse frequenze e il comportamento capacitivo prende il sopravvento.

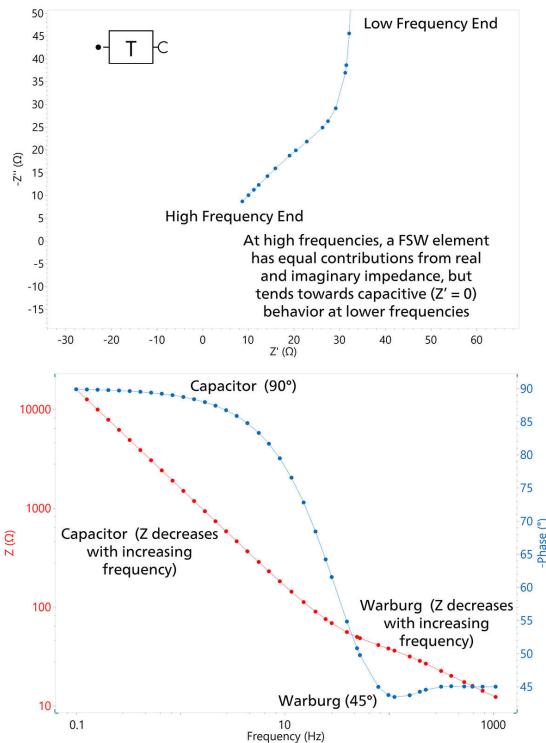


Figure 7. Diagrammi di Nyquist (in alto) e di Bode (in basso) per un elemento di Warburg nello spazio finito (T) e il simbolo associato in NOVA (intarsio nell'angolo in alto a sinistra).

ALTRI ELEMENTI

Gerischer, G

Se una reazione chimica di primo ordine precede la reazione elettrochimica in esame, allora è possibile

utilizzare il cosiddetto meccanismo chimico-elettrochimico o CE, ovvero l'elemento di Gerischer. L'impedenza di un elemento Gerischer è data da:

$$Z_G = \frac{1}{Y_0 \sqrt{K_a + j\omega}}$$

dove Y_0 ($S \sqrt{s}$) è il parametro contenente informazioni sulla diffusione (e ha la stessa definizione di Y_0 nel coefficiente di Warburg), K_a (s^{-1}) è la velocità di reazione della reazione chimica del primo ordine, $j = \sqrt{-1}$, e la frequenza angolare $\omega = 2\pi f$. In NOVA, l'elemento di Gerischer è rappresentato dal simbolo nella **Figura 8**.

I diagrammi di Nyquist e Bode per un elemento Gerischer appaiono molto simili a quelli di un elemento FLW (vedi **Figura 6**) in quanto condividono alcune caratteristiche comuni in termini di

comportamento dell'impedenza. Alle alte frequenze gli elementi si comportano in modo identico (e sono quindi indistinguibili l'uno dall'altro). Tuttavia, se si tracciassero entrambi gli elementi sullo stesso diagramma di Nyquist, si potrebbero notare alcune differenze nella regione delle basse frequenze, ovvero che generalmente il semicerchio avrà un diametro inferiore per un elemento G rispetto a un elemento FLW. È anche possibile che un secondo semicerchio appaia in un elemento G; questo non è solitamente il caso per un elemento FLW.

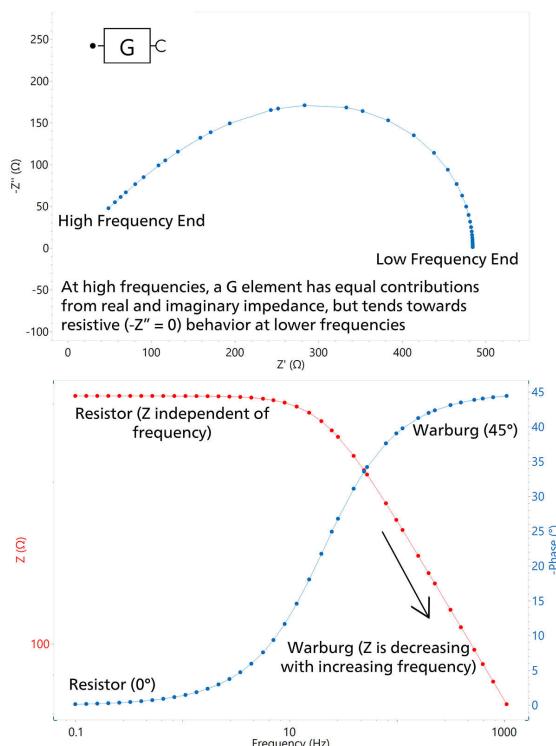


Figura 8. Nyquist (top) and Bode (bottom) plots for a Gerischer element (G), and the associated symbol in NOVA (inlay at top left corner).

Nota: Ottenerne la capacità effettiva dai valori CPE

Come mostrato in precedenza, l'elemento a fase costante (CPE) non fornisce il valore di capacità, ma piuttosto un parametro Y_0 ($S \sqrt{s}^n$) che contiene le informazioni sulla capacità. Per estrarre il valore di

capacità, vengono elencati i tre casi seguenti, a seconda del posizionamento del CPE in un circuito equivalente.

Il primo caso è quello di un CPE posto in parallelo a un resistore, R_p CPE (**Figura 9**). Questo tipo di circuito è anche noto come circuito di tipo Voigt.

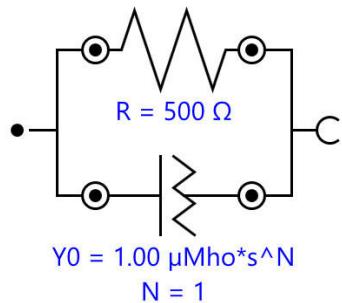


Figure 9. Circuito equivalente con un CPE in parallelo a un resistore.

In questa situazione, la capacità effettiva può essere

calcolata utilizzando la seguente equazione:

ALTRI ELEMENTI

$$C_{eff} (F) = Y_0 \cdot (\omega_{max})^{n-1}$$

ALTRI ELEMENTI

dove ω_{max} la frequenza angolare alla quale la parte immaginaria dell'impedenza raggiunge il suo valore massimo (ovvero, la sommità del semicerchio).

INel caso di un CPE in serie con un resistore R_s , R_s CPE, vedi **Figura 10**.

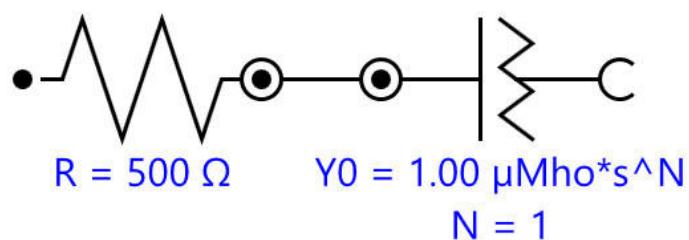


Figure 10. Circuito equivalente con un CPE in serie con un resistore.

Qui, la capacità effettiva può essere calcolata con la

seguente equazione:

$$C_{eff} (F) = Y_0^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{1}{R_s} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

ALTRI ELEMENTI

L'ultimo caso descritto qui è noto come circuito di Randles, noto anche con la sigla $R_s(R_pCPE)$. Pertanto, la seguente equazione dovrebbe essere

utilizzata quando un CPE è posto in parallelo con un resistore R_p e l'intera configurazione è anche in serie con un resistore R_s (vedi **Figura 11**).

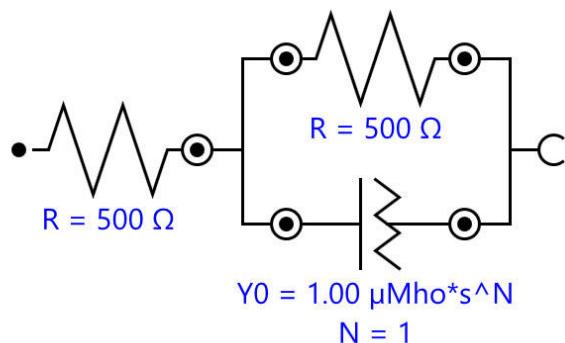


Figura 11. Circuito equivalente con un CPE in parallelo a un resistore, e questo in serie a un altro resistore.

In questo caso finale, la capacità effettiva C_{eff} può

essere calcolata come segue:

$$C_{eff} (F) = Y_0^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_p} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

CONCLUSIONE

In questa Application Note vengono forniti approfondimenti sui vari elementi elettrici utilizzati per realizzare circuiti equivalenti. Vengono inoltre

elencate le proprietà degli elementi, insieme ad esempi di utilizzo. Infine, vengono fornite le formule per estrarre la capacità effettiva dai valori di CPE.

CONTACT

Metrohm Italiana Srl
Via G. Di Vittorio, 5
21040 Origgio (VA)

info@metrohm.it

CONFIGURAZIONE



Software avanzato per la ricerca elettrochimica
NOVA è il pacchetto software progettato per controllare tutti gli strumenti Autolab con interfaccia USB.

Progettato da elettrochimici per elettrochimici e integrando oltre due decenni di esperienza degli utenti e la più recente tecnologia software .NET, NOVA offre più potenza e maggiore flessibilità al vostro potenziostato/galvanostato Autolab.

NOVA offre le seguenti caratteristiche uniche:

- editor di sequenza potente e flessibile
- chiara visione dei dati in tempo reale rilevanti
- potenti analisi dei dati e strumenti di plottaggio
- Controllo integrato per dispositivi esterni come dispositivi Metrohm Liquid Handling

[Scarica la versione più recente di NOVA](#)