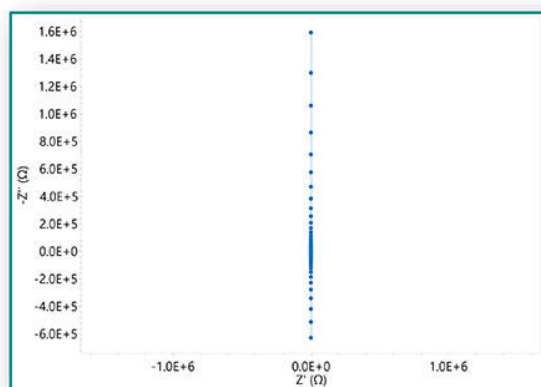
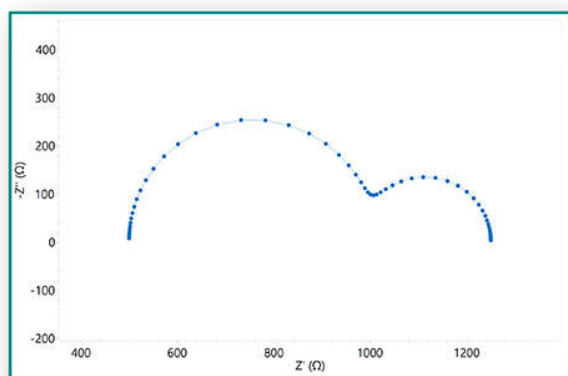
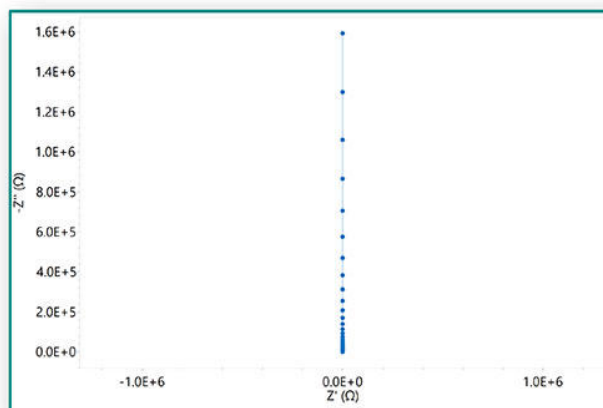
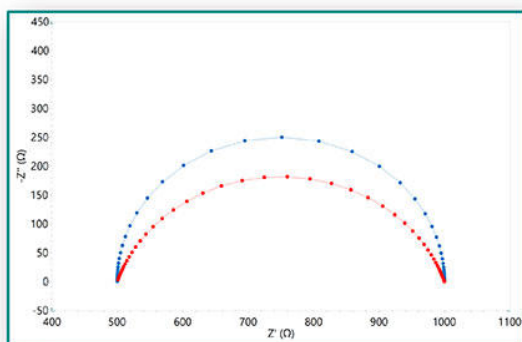




## Application Note AN-EIS-003

# Espectroscopía de impedancia electroquímica

## Parte 3 – Análisis de datos

La caracterización de sistemas electroquímicos con espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) requiere modelos adecuados para ayudar a interpretar los datos. Estos modelos se pueden dividir en dos categorías amplias: modelos de circuitos equivalentes y modelos de procesos. Los modelos se retroceden a datos experimentales para estimar parámetros que puedan describir adecuadamente los datos experimentales y usarse para predecir el comportamiento del sistema en diversas condiciones.

Esta serie de siete partes presenta el concepto y los conceptos básicos de EIS, junto con configuraciones experimentales, circuitos equivalentes comunes utilizados para ajustar datos y consejos para mejorar la calidad de los datos medidos y el ajuste. Esta nota de aplicación (parte 3) presenta los elementos de circuito más comunes que pueden ensamblarse en diferentes configuraciones para obtener circuitos equivalentes utilizados para el análisis de datos.

## MODELOS DE CIRCUITOS EQUIVALENTES

Es posible representar celdas electroquímicas completas, así como procesos físicos y químicos individuales, como una colección de elementos eléctricos básicos como resistencias o condensadores. Se pueden combinar conjuntos de dichos elementos en serie y en paralelo para construir lo que se denomina un modelo de circuito equivalente.

Como cada elemento eléctrico individual, cada proceso en la celda electroquímica tiene una

respuesta de frecuencia diferente y, por tanto, una impedancia diferente. Estos modelos son la forma más común de interpretar los datos de impedancia recopilados durante una medición EIS típica.

Las siguientes secciones describen cada elemento comúnmente utilizado para construir un circuito equivalente, junto con ejemplos de su equivalente en el mundo real (electroquímico).

## RESISTENCIA, R

Una resistencia R tiene una impedancia  $Z_R$  de:

$$Z_R (\Omega) = R$$

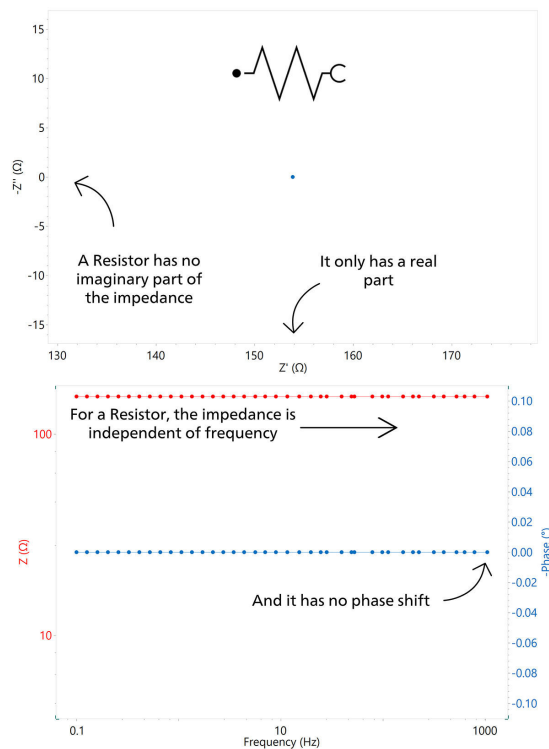
$$|Z_R| (\Omega) = R$$

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

---

La impedancia es independiente de la frecuencia y no tiene parte imaginaria. La corriente a través de una resistencia siempre está en fase con el voltaje, por lo tanto no hay cambio de fase. En NOVA, el elemento R está representado por el símbolo que se muestra en la parte superior central de **Figura 1**.

Algunos ejemplos del uso de una resistencia para describir fenómenos electroquímicos son la resistencia óhmica y la resistencia de polarización. Estos se describen con más detalle en las siguientes secciones.



**Figure 1.** Gráficos de Nyquist (arriba) y Bode (abajo) para el elemento de resistencia (R) y el símbolo asociado en NOVA (incrustación en la parte superior central).

### Resistencia óhmica, $R_{\Omega}$

La caída de potencial entre el electrodo de referencia y el electrodo de trabajo es la resistencia óhmica (también conocida como resistencia no compensada) y se puede modelar usando R. La resistencia óhmica

depende de la conductividad del electrolito y de la geometría del electrodo. Para un electrodo de disco giratorio, la resistencia óhmica viene dada por la siguiente ecuación:

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

dónde  $k$  ( $S\ cm^{-1}$ ) es la conductividad específica del electrolito a granel y  $r$  (cm) es el radio del disco.

Para geometrías más complejas, la resistencia óhmica se determina experimentalmente y puede estimarse mediante EIS. En un gráfico de Nyquist, la intersección de los datos de impedancia con la parte real del eje en el extremo de alta frecuencia da la resistencia óhmica.

### Resistencia a la polarización, $R_p$

Un electrodo está polarizado cuando su potencial se aleja de su valor en circuito abierto. La polarización de un electrodo hace que la corriente fluya debido a las reacciones electroquímicas que induce en la superficie del electrodo. La magnitud de la corriente está

controlada por la cinética de reacción y la difusión de los reactivos tanto hacia como desde el electrodo.

Por ejemplo, cuando un electrodo sufre corrosión uniforme en un circuito abierto, el potencial de circuito abierto (OCP) está controlado por el equilibrio entre las reacciones anódicas y catódicas que dan como resultado corrientes anódicas y catódicas. El OCP es el potencial donde las dos corrientes son iguales. El valor de la corriente para cualquiera de las reacciones se conoce como corriente de corrosión. Cuando las dos reacciones están bajo control cinético, el potencial de la celda se puede relacionar con la corriente mediante la ecuación de Butler-Volmer:

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

dónde  $i$  (A) es la corriente de celda medida,  $i_0$  (A) es la corriente de cambio, 2.303 es la conversión entre  $\log_e$  y  $\log_{10}$ ,  $\eta$  (V) es el sobrepotencial (definido como la diferencia entre el potencial aplicado  $E$  y el potencial de corrosión  $E_{corr}$ ), y  $\beta_a$  (V) y  $\beta_c$  (V) son las pendientes

de Tafel de la rama anódica y catódica, respectivamente.

Por sobrepotencial  $\eta$ , lo anterior se puede transformar a:

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

La resistencia a la polarización,  $R_p$  se comporta como una resistencia. Si se conocen las pendientes de Tafel, entonces  $i_0$  se puede calcular a partir de  $R_p$ . La

corriente de cambio  $i_0$  Luego se puede utilizar para calcular la velocidad de corrosión (ver [AN-COR-002](#)).

## CONDENSADOR, C

Un condensador C tiene una impedancia de:

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

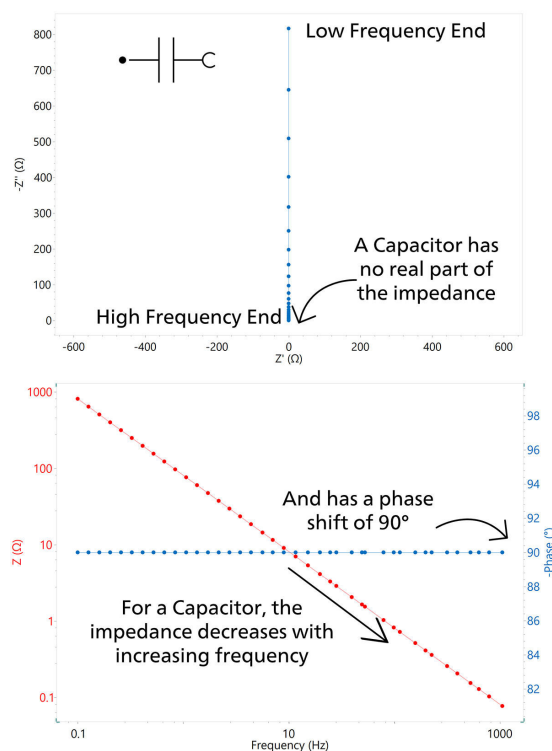
$$|Z_c| (\Omega) = \frac{1}{\omega C}$$

$$\theta_c (^\circ) = 90$$

dónde  $j = \sqrt{-1}$ , la frecuencia angular  $\omega = 2\pi f$ , y C (F) es la capacitancia.

La impedancia de los condensadores es función de la frecuencia y tiene sólo una parte imaginaria. La impedancia de un condensador disminuye a medida

que aumenta la frecuencia. La corriente que pasa por un condensador está desfasada  $90^\circ$  con respecto al voltaje. En NOVA, el elemento C está representado por el símbolo en **Figura 2**.



**Figure 2.** Gráficos de Nyquist (arriba) y Bode (abajo) para un condensador (C) y el símbolo asociado en NOVA (incrustación en la esquina superior izquierda).

A continuación se proporcionan algunos ejemplos del uso del condensador para describir fenómenos electroquímicos.

### Capacitancia de doble capa, $C_{DL}$

Existe una doble capa eléctrica en la interfaz electrodo/electrolito. Esta doble capa se forma cuando los iones de la solución se acercan a la superficie del electrodo. Las cargas en el electrodo están separadas de las cargas de estos iones. La separación es del orden de angstroms.

El valor de la capacitancia de doble capa depende de

muchas variables, incluido el potencial del electrodo, la temperatura, las concentraciones iónicas, los tipos de iones, las capas de óxido, la rugosidad del electrodo, la adsorción de impurezas y más. Para electrodos metálicos, los valores típicos para la capacitancia de doble capa están entre 10 y 20  $\mu F cm^{-2}$ .

### Capacitancia de recubrimiento, $C_C$

Para sustratos recubiertos de polímero, la capacitancia de recubrimiento  $C_C$  viene dada por la ecuación:

$$C_c = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{A}{d}$$


---

dónde  $\varepsilon_0$  ( $8.85 \times 10^{-12} \text{ F metro}^{-1}$ ) es la permitividad del vacío,  $\varepsilon$  es la permitividad relativa del recubrimiento,  $A$  ( $\text{metro}^2$ ) es el área del recubrimiento, y  $d$  (m) es el espesor del recubrimiento.

Los valores típicos de permitividad relativa de los recubrimientos oscilan entre 3 y 4, mientras que la permitividad relativa del agua es de alrededor de 80.

Cuando el agua penetra en el recubrimiento, su constante dieléctrica aumenta, lo que resulta en una mayor capacitancia del recubrimiento. Por eso,  $C_c$  Se puede utilizar para medir la cantidad de agua absorbida por el revestimiento. Por lo tanto, EIS es una técnica útil para monitorear cambios en recubrimientos.

## INDUCTOR, L

La impedancia de un inductor L viene dada por la

ecuación:

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

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

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


---

dónde  $j = \sqrt{-1}$ , la frecuencia angular  $\omega = 2\pi f$ , y  $L$  (H) es la inductancia.

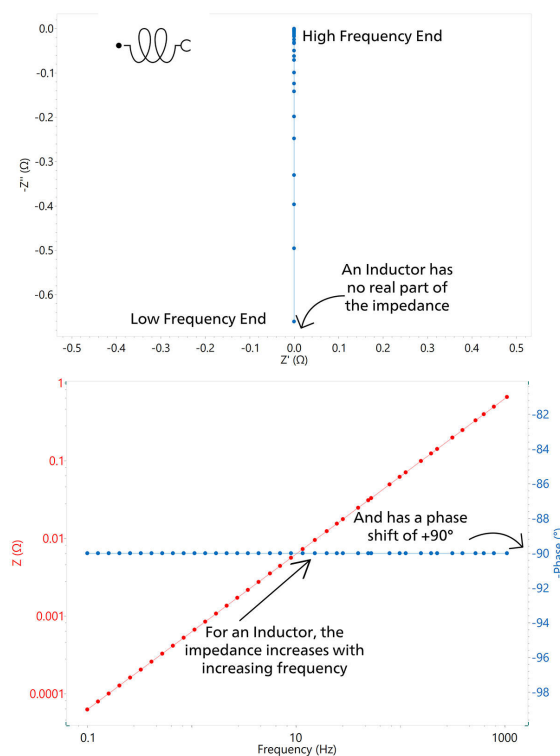
La impedancia de un inductor aumenta con la frecuencia. Al igual que los condensadores, los

inductores sólo tienen un componente de impedancia imaginario. Sin embargo, la corriente que pasa por un inductor tiene un desfase de  $-90^\circ$  con respecto al voltaje.

La impedancia de una celda electroquímica a veces puede parecer inductiva debido a la adsorción de reactivos en la superficie y puede modelarse mediante inductancia (generalmente a bajas frecuencias).

El comportamiento inductivo también puede resultar de una distribución de corriente no uniforme, inductancia de los cables de las celdas, respuesta

lenta de los electrodos de referencia y faltas de idealidad del potenciostato. En estos casos, la aparición de inductancia a altas frecuencias puede indicar un artefacto, un error o una no idealidad en la medición EIS. En NOVA, el elemento L está representado por el símbolo que se muestra en **figura 3**.



**Figure 3.** Gráficos de Nyquist (arriba) y Bode (abajo) para un inductor (L) y el símbolo asociado en NOVA (incrustación en la esquina superior izquierda).

## ELEMENTO DE FASE CONSTANTE, Q (O CPE)

Modelar un fenómeno electroquímico con un condensador ideal supone que la superficie investigada es homogénea, lo que normalmente no es el caso.

Esta falta de homogeneidad se modela con un elemento Q, utilizado para representar el elemento de fase constante (CPE):



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

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

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

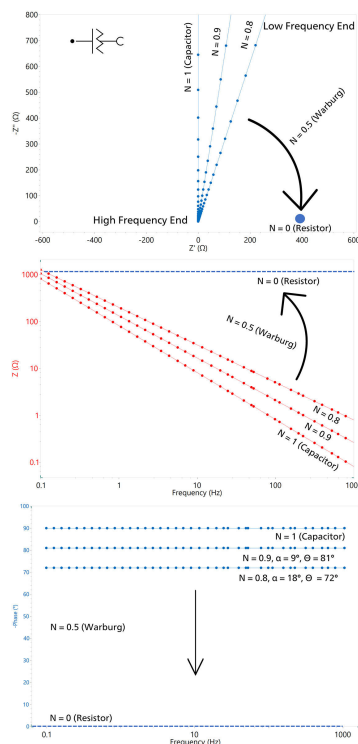
### ELEMENTO DE FASE CONSTANTE, Q (O CPE)

dónde  $Y_0 (Ss^n)$  es el parámetro que contiene la información de capacitancia,  $j = \sqrt{-1}$ , (la frecuencia angular) es igual a  $2F$ , es una constante empírica que va de 0 a 1 relacionada con la desviación de la línea capacitiva recta de  $90^{\circ}$ , y es el ángulo de desviación definido como  $= 90^{\circ} (1 - \alpha)$ .

Es de destacar que cuando  $\alpha = 1$ , el CPE se comporta

como un condensador puro, mientras que cuando  $\alpha = 0$ , el CPE se comporta como una resistencia pura. Además, cuando  $\alpha = 0,5$ , el CPE es el equivalente al llamado elemento de Warburg, que se describe en las siguientes secciones.

En NOVA, el elemento Q está representado por el símbolo que se muestra en **Figura 4**.



**Figure 4.** Gráficos de Nyquist (arriba) y Bode (abajo) para un elemento de fase constante (CPE) y el símbolo asociado en NOVA (incrustado en la esquina superior izquierda).

**Nota:** En estas ecuaciones (y en NOVA), la impedancia se define en términos de admitancia. Mientras que la impedancia de un material es una medida de cuánto se impide la corriente alterna en un circuito, la admitancia es una medida de cuánta corriente se admite. Por tanto, podemos considerar que la

admitancia es el recíproco (inverso) de la impedancia. En NOVA, las unidades de  $Y_0$  se dan como  $\text{Mho.s}^N$ . Esto equivale a decir ( $S \text{ s}^N$ ) como  $S$  (Siemens) = Mho. La capacitancia de doble capa y la capacitancia de recubrimiento, descritas en la sección anterior, generalmente se modelan con un CPE.

## MODELIZACIÓN DE LA DIFUSIÓN EN SISTEMAS ELECTROQUÍMICOS

En electroquímica, la capa de difusión es la región cercana a la superficie del electrodo donde la concentración de materiales electroactivos varía debido a la difusión de esos materiales hacia o desde la superficie del electrodo. Desempeña un papel en casi todos los procesos electroquímicos. Como tal, a menudo se emplean técnicas electroquímicas más «tradicionales», como la voltamperometría cíclica y la cronoamperometría, para estudiar la cinética de las reacciones y cómo las propiedades de la capa de

difusión impactan en ellas. Por lo tanto, para construir un modelo preciso de la interfaz electroquímica es importante modelar de forma independiente el proceso de difusión que tiene lugar. Se han desarrollado varios elementos de circuito para hacer esto, incluido el Warburg (W), el Warburg corto (O), el Warburg abierto (T) y la línea de transmisión (también conocida como Bisquert, B2). Las circunstancias bajo las cuales se debe elegir un elemento sobre el otro se explicarán en las siguientes secciones.

### Warburg, W: difusión semiinfinita

El elemento más simple (y más comúnmente utilizado) para modelar el comportamiento de la difusión, el elemento de Warburg, describe lo que sucede cuando tiene lugar la difusión lineal a un

electrodo plano grande (por ejemplo, lo que sucede en una celda tradicional de tres electrodos). Bajo este supuesto de una capa de difusión lineal semiinfinita, la impedancia se define como:

$$Z_w (\Omega) = \frac{1}{Y_0 \sqrt{j\omega}} = \frac{\sqrt{2}}{Y_0 \sqrt{\omega}} - j \frac{\sqrt{2}}{Y_0 \sqrt{\omega}}$$
$$|Z_w| (\Omega) = \frac{2}{Y_0 \sqrt{\omega}}$$
$$\theta_w (^\circ) = 45$$

dónde  $j = \sqrt{-1}$ , (la frecuencia angular) es igual a  $2\pi f$ , y  $Y_0$  ( $F s^{-1/2}$ ) es un parámetro que contiene información sobre la difusión.

El recíproco de esto se conoce como coeficiente de Warburg, generalmente señalado con el símbolo en la

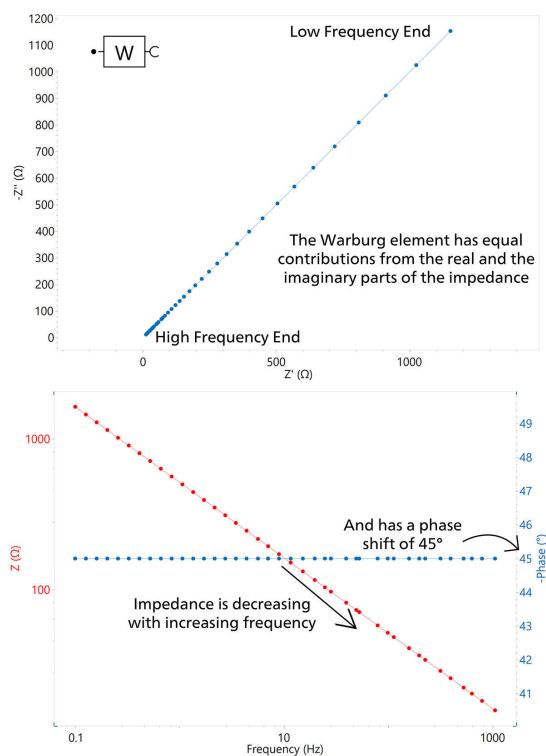
literatura científica. Cuando se trata de un sistema redox (cuasi) reversible donde tanto las formas oxidadas como las reducidas son solubles en solución, el coeficiente de Warburg está relacionado con la difusión de las formas disueltas mediante la ecuación:

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

dónde  $R$ ,  $T$ , y  $F$  tienen sus definiciones habituales,  $n$  es el número de electrones intercambiados,  $D$  es el coeficiente de difusión de la especie (donde los subíndices  $o$  y  $R$  representan especies oxidadas y reducidas, respectivamente),  $C^b$  es la concentración de la  $o$  y  $R$  especies en masa,  $A$  es el área de la superficie y  $\theta$  denota la fracción de la  $o$  y  $R$  especies

presentes.

Una impedancia de Warburg se caracteriza por tener contribuciones reales e imaginarias idénticas, lo que da como resultado un ángulo de fase de  $45^\circ$ . En NOVA, el elemento Warburg está representado por el símbolo en **Figura 5**.



**Figure 5.** Gráficos de Nyquist (arriba) y Bode (abajo) para un elemento de Warburg (W) y el símbolo asociado en NOVA (incrustación en la esquina superior izquierda).

### Warburg - terminal de cortocircuito, O: difusión finita

Como referencia, el terminal de cortocircuito de Warburg (simplemente denominado «corto de Warburg») también se conoce en NOVA como hiperbólico cotangente. También se conoce como FLW (Warburg de longitud finita) o elemento transmisivo de difusión finita en otras partes de la

literatura científica.

Este elemento está más asociado con la difusión a través de una capa de espesor finito que termina en un límite transmisivo (permeable). Bajo el supuesto de un espesor de capa de difusión finito (hipótesis de Nernst) con un extremo de cortocircuito, la impedancia de difusión se modela mediante:

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

Dónde,  $Y_0$  ( $S \sqrt{s}$ ) es el parámetro que contiene información sobre la difusión,  $j = \sqrt{-1}$ , (la frecuencia

angular) es igual a  $2F$ , y  $B$  ( $\sqrt{s}$ ) viene dada por la ecuación:

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

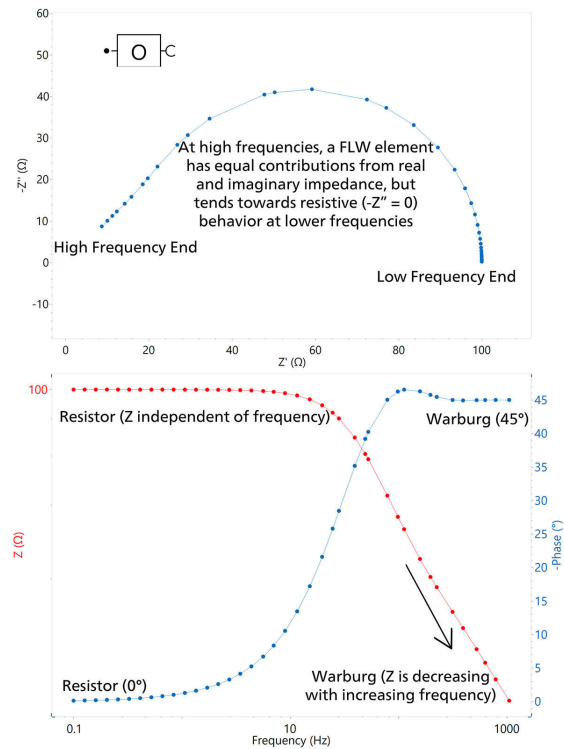
dónde  $\delta$  (cm) es el espesor de la capa de difusión y  $D$  ( $cm^2 s^{-1}$ ) es el coeficiente de difusión. Cabe señalar que cuando  $B$  es largo,  $z_0$  se reduce a  $z_W$ .  
Un ejemplo clásico del mundo real de cuándo utilizar

el elemento corto de Warburg es describir la difusión a un electrodo de disco giratorio, donde a través de convección forzada, la capa de difusión tiene un espesor finito dado por:

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

dónde  $D$  ( $cm^2 s^{-1}$ ) es el coeficiente de difusión, ( $cm^2 s^{-1}$ ) es la viscosidad cinemática de la solución, y  $\omega_{RDE}$  ( $rad s^{-1}$ ) es la frecuencia angular del electrodo de

disco giratorio. En NOVA, el elemento terminal de cortocircuito de Warburg está representado por el símbolo en **Figura 6**.



**Figure 6.** Gráficos de Nyquist (arriba) y Bode (abajo) para un elemento de Warburg de longitud finita (O) y el símbolo asociado en NOVA (incrustación en la esquina superior izquierda).

Como se muestra en el gráfico de Nyquist en **Figura 6**, a altas frecuencias el elemento corto de Warburg se comporta como un elemento típico de Warburg con un ángulo de fase de  $45^\circ$ . En frecuencias más bajas, el cortocircuito de Warburg se comporta más como una resistencia con la impedancia tendiendo hacia el eje  $Z'$ , produciendo un semicírculo en la región de baja frecuencia. Esto se refleja en el diagrama de Bode, que a bajas frecuencias (alrededor de 10 Hz), muestra que la impedancia se vuelve independiente de la frecuencia (comportamiento típico de una resistencia). Sin embargo, a frecuencias más altas, la impedancia se parece más a la de un condensador, ya que la impedancia comienza a disminuir al aumentar la frecuencia. Mientras que el diagrama de Bode muestra que a bajas frecuencias la impedancia (que se comporta principalmente como una resistencia) se vuelve independiente de la frecuencia, y a frecuencias

más altas adquiere un carácter más capacitivo, la impedancia comienza a disminuir al aumentar la frecuencia. El ángulo de fase es de  $0^\circ$  en bajas frecuencias (R) y de  $45^\circ$  en altas frecuencias (W).

#### **Warburg – terminal de circuito abierto, T: difusión finita**

Como referencia, el terminal del circuito abierto de Warburg (simplemente denominado «Warburg abierto») también se conoce en NOVA como tangente hiperbólica. En otras partes de la literatura científica se le conoce como FSW (Warburg de espacio finito), o elemento reflectante de difusión finita.

Este elemento está más asociado con la difusión a través de una capa de espesor finito que termina en un límite reflectante (impermeable). Bajo el supuesto de un espesor de capa de difusión finito (hipótesis de Nernst) con un terminal de circuito abierto, la impedancia de difusión se modela mediante:

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

dónde  $Y_0$  ( $S \sqrt{s}$ ) es el parámetro que contiene información sobre la difusión,  $j = \sqrt{-1}$ , la frecuencia

angular  $= 2\pi f$ , y  $B$  ( $\sqrt{s}$ ) es dado por:

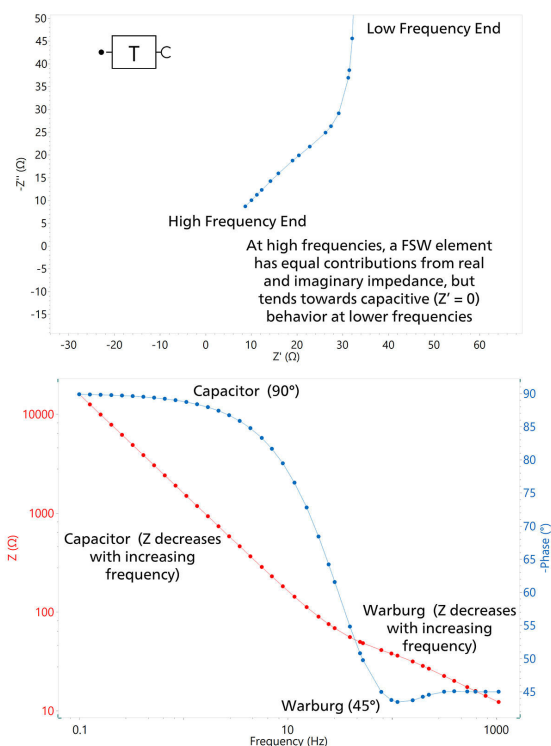
$$B = \frac{\delta}{\sqrt{D}}$$

dónde ( $\delta$ ) es el espesor de la capa de difusión y  $D$  ( $cm^2 s^{-1}$ ) es el coeficiente de difusión.

Para un ejemplo del mundo real, el elemento abierto de Warburg debería usarse para modelar la difusión finita de especies a través de una película delgada (p. ej., a través de un polímero conductor depositado sobre una superficie metálica), electrodos porosos (p. ej., el elemento Bisquert, B2) , o la difusión de iones dentro de un electrodo de almacenamiento, como en las baterías de iones de litio.

En NOVA, el elemento terminal de circuito abierto de Warburg está representado por el símbolo en **Figura**

7. Al igual que el elemento corto de Warburg, a altas frecuencias el Warburg abierto se comporta como un elemento de Warburg tradicional con un ángulo de fase de  $45^\circ$ . A frecuencias más bajas, el elemento tiende a un comportamiento más capacitivo con sólo una contribución imaginaria (**Figura 7**). El diagrama de Bode muestra que la impedancia disminuye a medida que aumenta la frecuencia y el ángulo de fase es de  $45^\circ$  en frecuencias altas donde domina la componente W. Comienza a aumentar una vez que se alcanza la región de baja frecuencia y el comportamiento capacitivo toma el control.



**Figure 7.** Gráficos de Nyquist (arriba) y Bode (abajo) para un elemento de Warburg de espacio finito (T) y el símbolo asociado en NOVA (incrustado en la esquina superior izquierda).

## OTROS ELEMENTOS

### Gerischer, G.

Si una reacción química de primer orden precede a la reacción electroquímica que se está investigando, entonces se puede utilizar el llamado mecanismo

químico-electroquímico o CE, el elemento de Gerischer.

La impedancia de un elemento de Gerischer viene dada por:

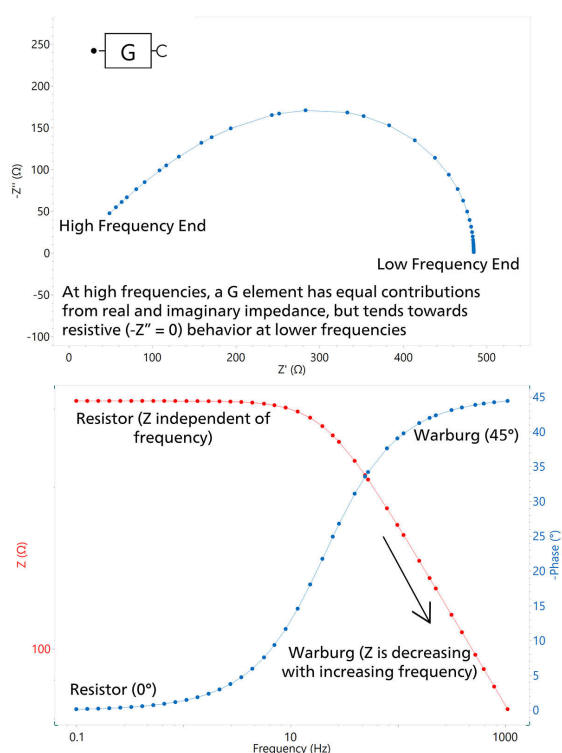
$$Z_G = \frac{1}{Y_0 \sqrt{K_a + j\omega}}$$



dónde  $Y_0$  ( $S \sqrt{s}$ ) es el parámetro que contiene información sobre la difusión (y tiene la misma definición que  $Y_0$  en el coeficiente de Warburg),  $k_a$  ( $s^{-1}$ ) es la velocidad de reacción de la reacción química de primer orden,  $j = \sqrt{-1}$ , y la frecuencia angular  $\omega = 2f$ . En NOVA, el elemento Gerischer está representado por el símbolo en **Figura 8**.

Los gráficos de Nyquist y Bode para un elemento de Gerischer parecen muy similares a los de un elemento FLW (ver **Figura 6**) ya que comparten algunas características comunes en términos de su

comportamiento de impedancia. A altas frecuencias los elementos se comportan de forma idéntica (y por tanto no se pueden distinguir entre sí). Sin embargo, si se graficaran ambos elementos en el mismo diagrama de Nyquist, se pueden notar algunas diferencias en la región de baja frecuencia, es decir, que generalmente el semicírculo tendrá un diámetro más pequeño para un elemento G en comparación con un FLW. También es posible que aparezca un segundo semicírculo en un elemento G; Este no suele ser el caso de las PDA.



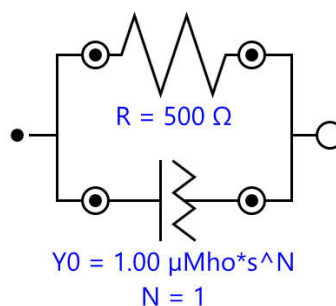
**Figure 8.** Gráficos de Nyquist (arriba) y Bode (abajo) para un elemento de Gerischer (G) y el símbolo asociado en NOVA (incrustación en la esquina superior izquierda).

### Nota: Obtención de la capacitancia efectiva a partir de los valores de CPE

Como se mostró antes, el elemento de fase constante (CPE) no proporciona el valor de capacitancia, sino más bien un parámetro  $Y_0$  ( $S s^{-n}$ ) que contiene la información de capacitancia. Para extraer el valor de

capacitancia, se enumeran los siguientes tres casos, dependiendo de la ubicación del CPE en un circuito equivalente.

El primer caso es el de un CPE colocado en paralelo con una resistencia,  $R_p$ CPE (**Figura 9**). Este tipo de circuito también se conoce como circuito tipo Voigt.



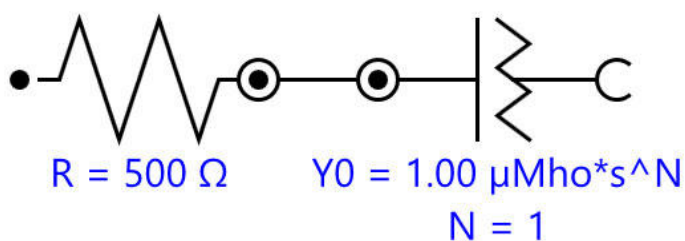
**Figure 9.** Circuito equivalente con un CPE en paralelo con una resistencia.

En esta situación, la capacitancia efectiva se puede calcular usando la siguiente ecuación:

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

dónde  $\omega_{max}$  es la frecuencia angular donde la parte imaginaria de la impedancia alcanza su valor máximo (es decir, la parte superior del semicírculo).

En el caso de un CPE en serie con una resistencia  $R_s$ ,  $R_{s,CPE}$ , ver **Figura 10**.



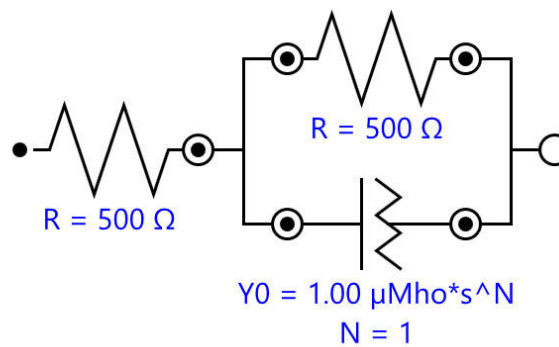
**Figure 10.** Circuito equivalente con un CPE en serie con una resistencia.

Aquí, la capacitancia efectiva se puede calcular con la siguiente ecuación:

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

El último caso descrito aquí se conoce como circuito de Randles, también conocido por la abreviatura  $R_s(R_pCPE)$ . Por lo tanto, se debe utilizar la siguiente

ecuación cuando un CPE se coloca en paralelo con una resistencia  $R_p$  y todo este arreglo también está en serie con una resistencia  $R_s$  (ver Figura 11).



**Figure 11.** Circuito equivalente con un CPE en paralelo con una resistencia, y este está en serie con otra resistencia.

En este último caso, la capacitancia efectiva  $C_{eff}$  se

puede calcular de la siguiente manera:

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

## CONCLUSIÓN

En esta nota de aplicación, se brinda información sobre los diversos elementos eléctricos utilizados para construir circuitos equivalentes. Además, se enumeran las propiedades de los elementos, junto

con ejemplos de utilización. Finalmente, se dan fórmulas para extraer la capacitancia efectiva de los valores de CPE.

## CONTACT

Metrohm México  
Calle. Xicoténcatl #181, Col  
Del Carmen, Alcaldía  
Coyoacán.  
04100. Ciudad de México  
México

info@metrohm.mx

## CONFIGURACIÓN



### Software avanzado para la investigación electroquímica

NOVA es el paquete diseñado para controlar todos los aparatos de Autolab con la interfaz USB.

Este paquete, creado por electroquímicos para electroquímicos y que integra más de 2 décadas de experiencia del usuario y la última tecnología de software .NET, aporta más potencia y flexibilidad al potencióstato/galvanostato de Autolab.

NOVA ofrece las siguientes funciones únicas:

- Editor de procedimientos flexible y potente
- Visión conjunta y clara de los datos importantes en tiempo real
- Potentes herramientas de representación y análisis de datos
- Control integrado de los aparatos externos, como los aparatos de manejo de líquidos de Metrohm

[Descargue la última versión de NOVA](#)