

Utilización de la técnica de ruido electroquímico para la investigación y monitoreo de la corrosión

Hellmut Sarmiento Klapper*, Joachim Goellner**,
Andreas Heyn***

Resumen

La posibilidad de registrar y analizar, con extrema sensibilidad y en tiempo real, distanciamientos espontáneos del estado de equilibrio en reacciones electroquímicas inherentes a un fenómeno corrosivo ha posibilitado, a la técnica de Ruido electroquímico, abrir un sin número de alternativas para la investigación y monitoreo de la corrosión. No obstante, sus múltiples ventajas frente a los métodos electroquímicos tradicionales sólo serán aprovechadas y optimizadas si son tenidas en cuenta importantes consideraciones en cuanto a la concepción de los equipos de medida utilizados, a la correcta planificación de procedimientos experimentales y a la óptima selección de adecuados métodos para el análisis e interpretación de las señales, garantizando, de esa forma, la confiabilidad y precisión de la valiosa información electroquímica obtenida.

Palabras claves: Ruido electroquímico, sistema de registro, métodos de análisis.

Resumen

Electrochemical noise has made possible, with extreme sensibility the online record and analysis of spontaneous distancing of the equilibrium state of electrochemical reactions related to corrosion, increasing the possibilities for the investigation and monitoring of corrosion. Nevertheless, these possibilities opposing the traditional electrochemical methods can only be taken advantage of and optimized if many important considerations on the measurement devices, the correct planning of experimental procedures and the correct selection of suitable methods for analysis and interpretation of the signals are taken into account.

Key words: Electrochemical Noise, Record Device, Signal Analysis.

Fecha de recepción: 17 de abril de 2007
Fecha de aceptación: 22 de junio de 2007

* Ingeniero Químico, Universidad Industrial de Santander, 2003. M.Sc. Mechanical and Process Engineering, OvG Universität Magdeburg, 2006. Estudiante de Doctorado, OvG-Universität Magdeburg.

Correspondencia: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Universitätsplatz 2 D-39106, Magdeburg, Alemania. helmuth.sarmiento@mb.uni-magdeburg.de

** Dr-Ing. OvG-Universität Magdeburg. joachim.goellner@mb.uni-magdeburg.de

*** Dr-Ing. OvG-Universität Magdeburg. andreas.heyne@mb.uni-magdeburg.de

En parte por casualidad [1], en parte como consecuencia de investigación científica orientada hacia ese fin [2], se pudo establecer, a finales de los años sesenta, que los sistemas en corrosión electroquímica producen por sí mismos, es decir, bajo ningún tipo de excitación externa, señales en forma de pequeñas variaciones estocásticas en potencial y en corriente, suministrando, así, valiosa información de los procesos asociados a la superficie metálica. Dicho fenómeno se conoce desde entonces como Ruido electroquímico.

El registro e interpretación del ruido electroquímico para el estudio de la corrosión involucra, no obstante, una forma completamente diferente de concebir el fenómeno a la empleada por los métodos electroquímicos tradicionales. Según estos, la corrosión es considerada como un proceso en equilibrio y de cinética constante, mientras que, en el caso del ruido electroquímico, se registran desequilibrios en las reacciones electroquímicas en intervalos de tiempo muy cortos [3]. Además, la velocidad e intensidad de dichas señales en forma de pequeñas variaciones en potencial y corriente, según el tipo de material, las características de su superficie en contacto con el medio, las condiciones de este último, así como diferentes factores de diseño, permiten la obtención de información electroquímica del proceso corrosivo en tiempo real con tanta sensibilidad que, incluso, pueden registrarse procesos de nucleación submicroscópicos de la corrosión, indetectables con otros métodos y, por supuesto, a simple vista.

El enorme interés en el aprovechamiento de la ventajosa técnica para la investigación de la corrosión a nivel de laboratorio, así como su exitosa aplicación en el monitoreo de la misma a nivel industrial, han llevado a un importante desarrollo de los sistemas y procedimientos de registro con el fin de garantizar la confiabilidad y precisión de las señales, además de la implementación de métodos de análisis más adecuados con el fin de realizar una más sencilla y mejor interpretación de la información obtenida. A pesar de todo, el ruido electroquímico es, como la corrosión misma, un fenómeno de gran complejidad y, por tanto, está sujeto a innumerables factores de influencia. En consecuencia, la omisión de importantes consideraciones en cuanto a la obtención, registro y análisis, concretamente, a las posibles interferencias internas y externas sobre la señal, derivadas de estos procesos, puede llevar a falsas interpretaciones de la información obtenida o, peor aún, a la obtención de información que de ninguna manera esté relacionada con el proceso corrosivo. Por esta razón, dichas interferencias deberán ser identificadas e indispensablemente minimizadas.

Acorde con esta problemática, el objetivo de este trabajo consiste en presentar los principios básicos de la técnica de ruido electroquímico, así como las consideraciones más importantes para la concepción de un sistema para su registro confiable, la implementación de correctos procedimientos experimentales y la selección de adecuados métodos para el análisis e interpretación de las señales obtenidas en la investigación y monitoreo de la corrosión.

FUENTES DEL RUIDO ELECTROQUÍMICO

Entender el origen del ruido electroquímico es el principio para entender la aplicabilidad de esta técnica. En este sentido, la interfase metal (capa de productos de corrosión) / electrolito es el punto donde se producen en forma continua las señales de ruido electroquímico en forma de pequeñas variaciones (transientes) en potencial y corriente, las cuales están relacionadas con los procesos de transferencia de carga que allí ocurren. Por lo tanto, el fenómeno del ruido electroquímico no es, bajo ninguna circunstancia, la respuesta a algún tipo de excitación externa del sistema, sino en realidad una consecuencia inherente a los procesos electroquímicos involucrados en la corrosión, que ocurre aun cuando no se esté midiendo [3].

De este modo, las variaciones en potencial y corriente registradas como señales electroquímicas se derivan de la estocástica disolución del metal, ocasionada, en primera medida, por la presencia de sitios de diferente energía en la superficie relacionados con heterogeneidades propias del material, como son: segregaciones, impurezas, fases de diferente composición química, tratamientos térmicos y mecánicos, anisotropías o defectos en la estructura cristalina. Ello hace, de la común consideración de una superficie homogénea, una rareza.

Siendo el principio de mínima energía la fuerza motriz de la corrosión, se entiende, entonces, que el proceso de disolución metálica ocurra bajo diferentes cinéticas de transferencia de carga dependiendo de las condiciones locales de la superficie. De forma análoga, heterogeneidades en el medio, como, por ejemplo: gradientes de concentración y temperatura o la presencia de procesos de transferencia de masa difusionales a través de las capas de productos de corrosión, contribuyen también a la variación en la interfase de las resistencias, a la polarización del electrolito, de la capacitancia de la doble capa y de la impedancia de Warburg (en caso de presencia de capas de productos de corrosión), inherentes al fenómeno eléctrico de transferencia de carga. Estas heterogeneidades son causa, por todo lo planteado, de una

desequilibrada o transiente disolución del metal y, en últimas, la fuente más importante del ruido electroquímico [3].

Fenómenos de corrosión localizada, como el picado y la corrosión en rendijas entre otros, por tratarse de procesos electroquímicos estocásticos relacionados con la activación y repasivación local en la interfase metal (capa pasiva) / electrolito representan también una importante fuente de ruido electroquímico [4]. Precisamente, en este campo, es donde la técnica de ruido electroquímico ha experimentado sus mayores avances y ha permitido de forma única el registro de los procesos submicroscópicos que dan origen a estas formas de corrosión.

Adicionalmente, fuerzas hidrodinámicas en el electrolito [5, 6], como el impacto de partículas sobre la superficie metálica en sistemas bajo corrosión-erosión, interacciones de orden físico de los productos de las reacciones electroquímicas como la evolución de Hidrógeno [7] o el desprendimiento de gases [8], han sido considerados también como fuentes de ruido electroquímico y, solamente mediante la correcta elección de los parámetros de registro de la señal, podrán ser aisladas de aquellas directamente relacionadas con la disolución electroquímica del metal.

REGISTRO DEL RUIDO ELECTROQUÍMICO

El diagnóstico a partir de las señales de ruido electroquímico es muy fácil y confiable cuando estas se miden y analizan correctamente. La pregunta es, entonces, ¿qué significa medir y analizar correctamente? En principio, para la concepción de un sistema de registro de ruido electroquímico deben estar indispensablemente claras la aplicación del mismo y las fuentes de ruido asociadas al sistema a investigar. El registro y análisis del ruido electroquímico involucra mucho más que conectar un equipo de medida al sistema investigado, en cambio, deben ser indispensablemente considerados una gran cantidad de factores de influencia, cuya compleja interrelación se representa de forma esquemática en la Figura 1. Esto conlleva, en últimas, a que se logre una definición específica de los procedimientos experimentales y a la correcta selección de un adecuado sistema de registro con sus correspondientes parámetros, garantizando la obtención de información del proceso corrosivo de forma confiable.

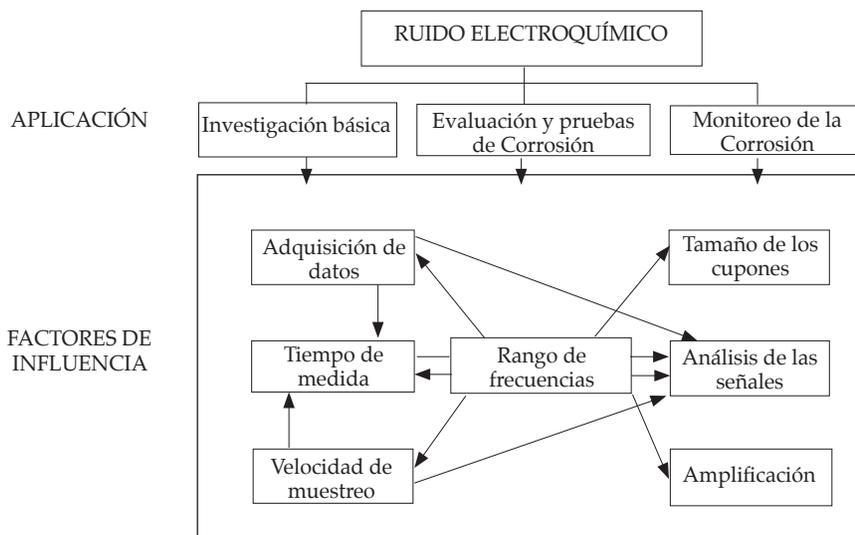
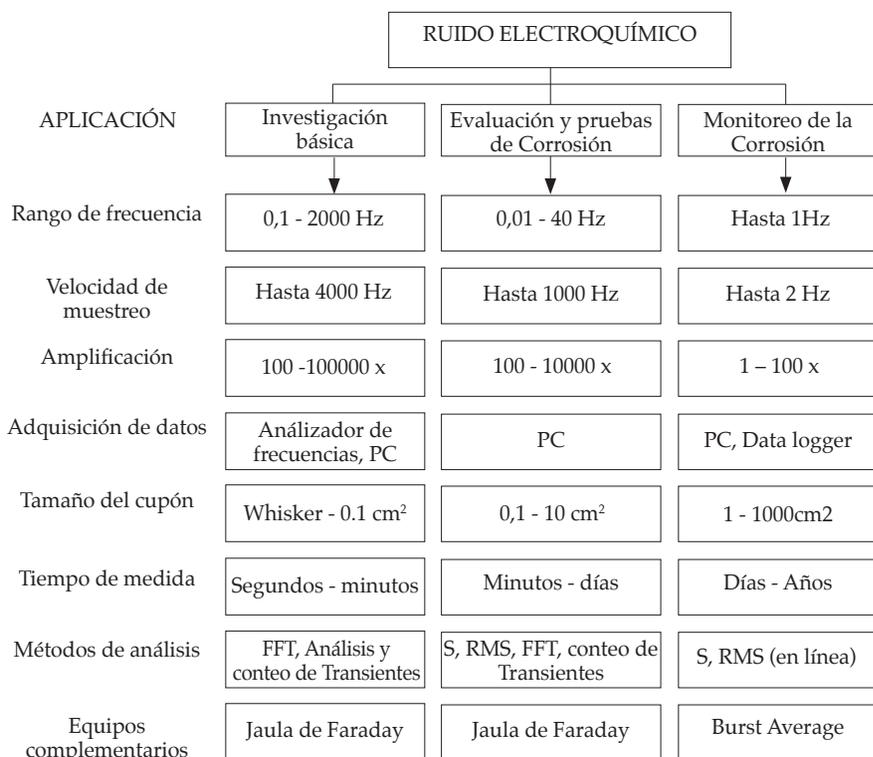


Figura 1. Interdependencia de los factores de influencia sobre las señales de Ruido electroquímico [3].

La aplicación de la técnica de ruido electroquímico en el ámbito de la corrosión se puede clasificar en tres campos diferentes: investigación básica de fenómenos corrosivos, pruebas y evaluación de la corrosión, y monitoreo a nivel industrial de la misma [3]. A su vez, cada uno de ellos contempla diferentes parámetros y condiciones de registro específicos, los cuales se resumen en el Cuadro 1. Las grandes variaciones, en cuanto a los parámetros de registro y adquisición de la señal según la aplicación, permiten concluir que para el registro del ruido electroquímico no existe un sistema universal y, por ende, su concepción estará siempre directamente relacionada con su aplicación.

Un sistema general para el registro de ruido electroquímico se divide en tres partes principales. En primer lugar, se tiene el elemento de medida, entendiéndose por este el sistema electroquímico, en especial, el electrodo de trabajo y, por tanto, todos los posibles factores internos y externos que podrían actuar como variables de influencia sobre el mismo. En segundo lugar, se encuentran los equipos para medidas electroquímicas (potencial y corriente) y los accesorios necesarios para efectuar las mismas, junto a los dispositivos de amplificación y filtros, cuyas características estarán definidas como ya se mencionó, por cada aplicación específica (Cuadro 1). Finalmente, aparece el sistema de adquisición de datos, para el cual se

deberán establecer unos parámetros técnicos dependientes de la aplicación y del sistema a investigar.



Cuadro 1

Parámetros y condiciones de registro y análisis recomendadas para las diferentes aplicaciones de la técnica de ruido electroquímico [3].

Para efectuar medidas de ruido electroquímico, como para la mayoría de los métodos electroquímicos, se puede emplear un arreglo general en forma de celda conteniendo el electrolito, tal y como se muestra en la Figura 2b, en el cual se emplean los accesorios típicos para el registro de potencial y corriente: electrodos de trabajo (WE), electrodo de referencia (RE). Adicionalmente, se puede emplear un contra electrodo cuando se realicen medidas bajo polarización. Diferentes arreglos de electrodos han sido empleados y son reseñados por la literatura; sin embargo, una disposición básica, como la que muestra la Figura 2^a, considera la medida de corriente entre dos electrodos de trabajo exactamente iguales (WE1 y 2) y la medida de potencial entre los electrodos de trabajo y el electrodo de referencia (RE), que bien

podría ser según la aplicación, un tercer idéntico electrodo. Un accesorio muy importante para las medidas de ruido electroquímico lo constituye la Jaula de Faraday, la cual es utilizada como elemento de protección frente a las interferencias externas (campos eléctricos, campos magnéticos y campos electromagnéticos) que pueden afectar las señales (Figura 2c). Dicha jaula deberá ser indispensablemente empleada cuando se deseen llevar a cabo medidas con alta sensibilidad y se tenga un límite superior del rango de frecuencias cercano a la frecuencia de la fuente de energía alterna utilizada para los equipos de medida (60 Hz). Cuando no se utilizan altos factores de amplificación y el límite superior del rango de frecuencias está muy por debajo de la frecuencia de la fuente de corriente alterna, se puede omitir el uso de la misma. Es recomendable, además, realizar todas las conexiones entre la celda electroquímica, la Jaula de Faraday y el equipo de medida, empleando conectores tipo BNC como protección ante interferencias electromagnéticas externas.

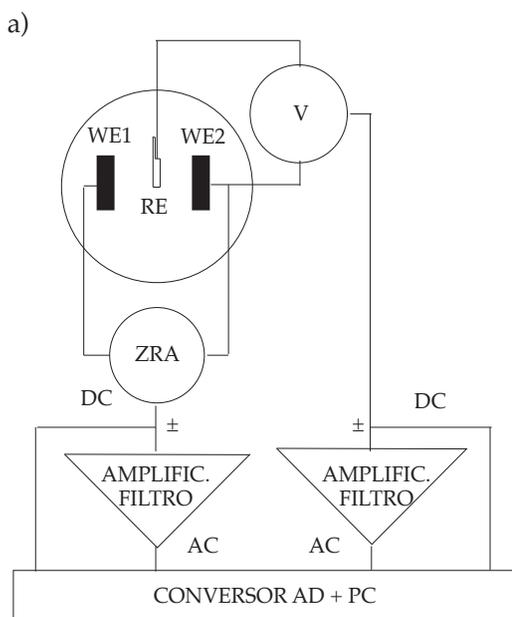


Figura 2 a) Representación esquemática de un sistema general para el registro de ruido electroquímico.

b)

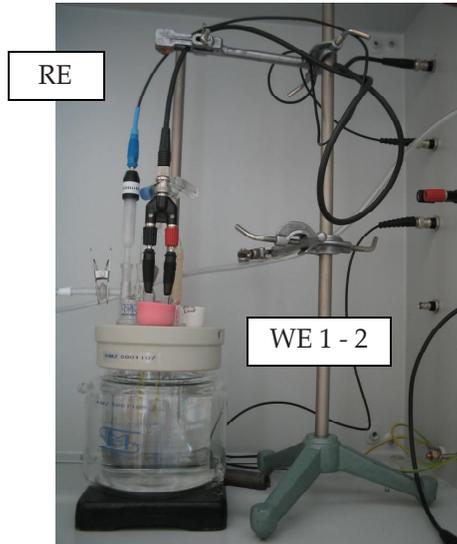


Figura 2 b) Celda electroquímica y accesorios empleados en las medidas de ruido electroquímico.

c)

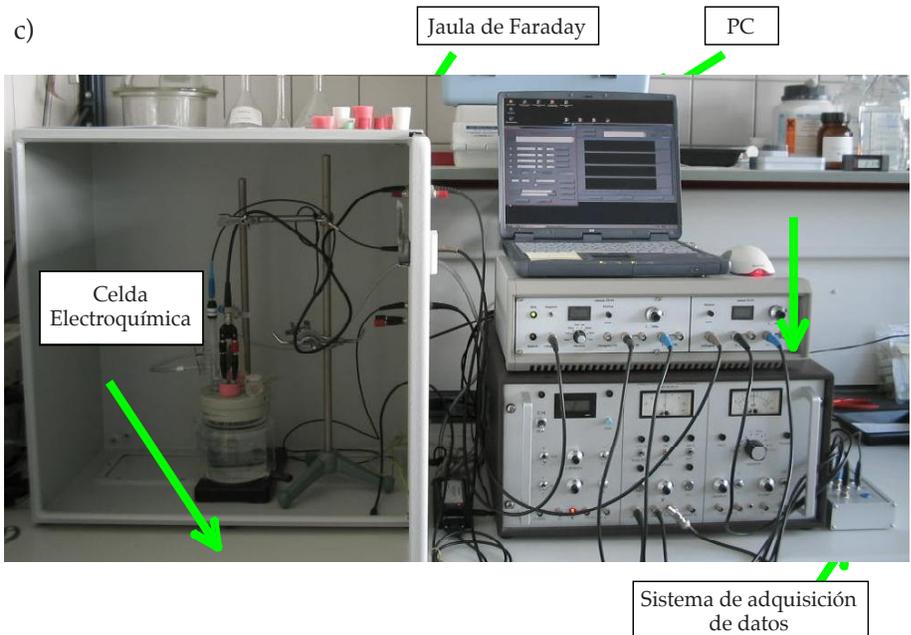


Figura 2 c) Sistema para la obtención, registro y análisis de las señales de ruido electroquímico.

Como se mencionó con antelación, para efectuar el registro de ruido electroquímico, no existe un equipo de medida universal, pero sí una configuración general como la que se presenta de forma esquemática en la Figura 2a. Esta configuración consta de un dispositivo de medida de corriente basado en el principio de cero resistencia (ZRA: Zero Resistance Ammeter), así como un dispositivo con una alta resistencia de entrada, aproximadamente del orden de 10^{14} , para efectuar las medidas de potencial (V). El acondicionamiento de las señales obtenidas mediante el uso de amplificadores y filtros es también una parte muy importante de los equipos de medida y varía generalmente de acuerdo con la concepción (filosofía) desarrollada tanto por el constructor como por el usuario final. La descripción general de uno de estos conceptos para el tratamiento de las señales de ruido electroquímico se presenta a continuación. Las señales provenientes de ambos dispositivos son inicialmente filtradas, separando de esta forma las componentes DC y AC de la señal. Mientras la componente DC de corriente y potencial es separada a través de un filtro *low-pass* con una definida frecuencia de corte para evitar la interferencia de las altas frecuencias, la componente AC es, por otra parte, filtrada a través de un filtro *high-pass*, lo cual es muy recomendable, ya que, como la componente DC no es amplificada, se pueden alcanzar más altos factores de amplificación y, con ello, una mejor resolución de las señales de ruido. Esto representa una ventaja importante cuando se hacen medidas con sistemas electroquímicos que tienen un alto componente de DC (Figura 3). Dependiendo de las fuentes de ruido electroquímico presentes en el sistema, se requiere comúnmente que la componente AC de potencial y corriente sean amplificadas, siendo posteriormente filtradas dentro de un rango definido de frecuencia y obteniéndose, así, las señales de ruido electroquímico en corriente y potencial. El rango de frecuencias es una medida recíproca de la duración de los eventos registrados. En consecuencia, la elección de dicho rango se debe hacer de acuerdo con el tiempo de duración esperado para los eventos (transientes) que conforman la señal; por ejemplo, se han podido establecer procesos de nucleación de la corrosión correspondientes a eventos entre 10 a 100ms y de picado metaestable entre 0,1 y 1s [9].

Los filtros se constituyen en una parte muy importante del sistema de registro de las señales de ruido electroquímico y, para su uso, se suelen emplear dos tipos: análogos y digitales, cada uno con sus ventajas y desventajas. Sin embargo, se ha observado que el uso de filtros análogos permite obtener una mejor calidad de las señales de ruido posterior a su digitalización. De todos modos, los filtros no actúan de forma ideal, por lo tanto, la dinámica del filtro así como el rango de frecuencias elegido afectará la forma de

las señales obtenidas y, en consecuencia, ambos parámetros deberán ser considerados para el posterior análisis de las mismas. Las Figuras 4a, b y c muestran de forma clara la influencia del rango de frecuencia sobre las señales de ruido electroquímico de un sistema bajo picado.

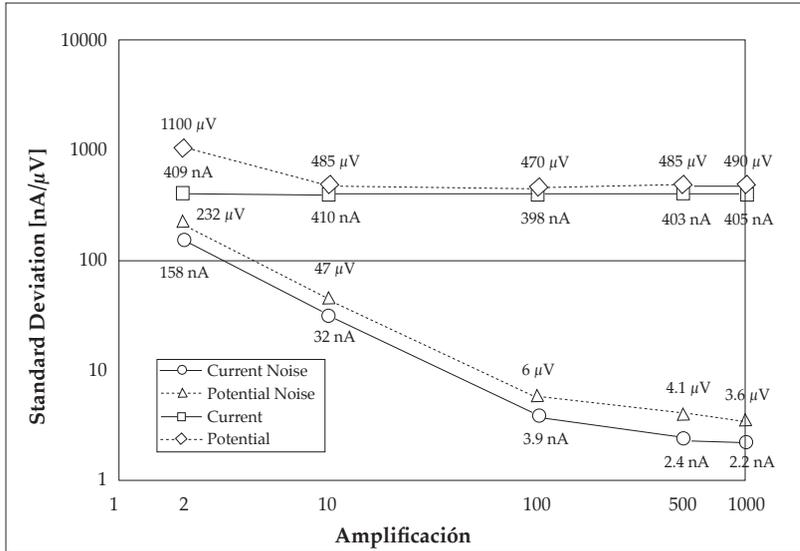


Figura 3. Aumento de los límites de detección a través del uso de un filtro *high pass* y de amplificación, en las señales de ruido electroquímico del sistema: Acero de alta aleación en una solución neutral, rango de frecuencia: 0,1-10Hz. [10]

El sistema de adquisición de datos se basa en la discretización de señales análogas a través de un convertor análogo-digital (Convertor AD), que debe seleccionarse de acuerdo con el rango de entrada y la resolución del mismo y, por consiguiente, de acuerdo con el límite de detección del sistema. Comúnmente son empleados convertidores AD de 12,14 o 16 bit. De forma general, se debe elegir, para cada aplicación, un convertor AD de acuerdo con la resolución necesaria, así como con el precondicionamiento de la señal (amplificación, filtrado) y los requerimientos en cuanto a las velocidades de muestreo. Así mismo, los convertidores AD con alta resolución alcanzan por lo general limitadas velocidades de muestreo. La selección de la velocidad de muestreo (*sampling rate*), uno de los parámetros más importantes para el registro del ruido electroquímico, se debe hacer cumpliendo siempre el teorema de muestreo de Nyquist-Shanon, es decir, la velocidad de muestreo debe ser mayor al doble del límite superior del rango de frecuencia elegido, evitando de esta forma el fenómeno de Aliasing de la señal y por

consiguiente la distorsión o pérdida de información. Como parte del sistema de adquisición de datos, es común, además, emplear un *software* de registro que brinde la posibilidad de relacionar todos los parámetros antes mencionados y, por lo tanto, los ordenadores (PC o *Laptops*) también hacen parte importante de este. En la Figura 2c, se muestra un sistema completo para el registro de señales de ruido electroquímico.

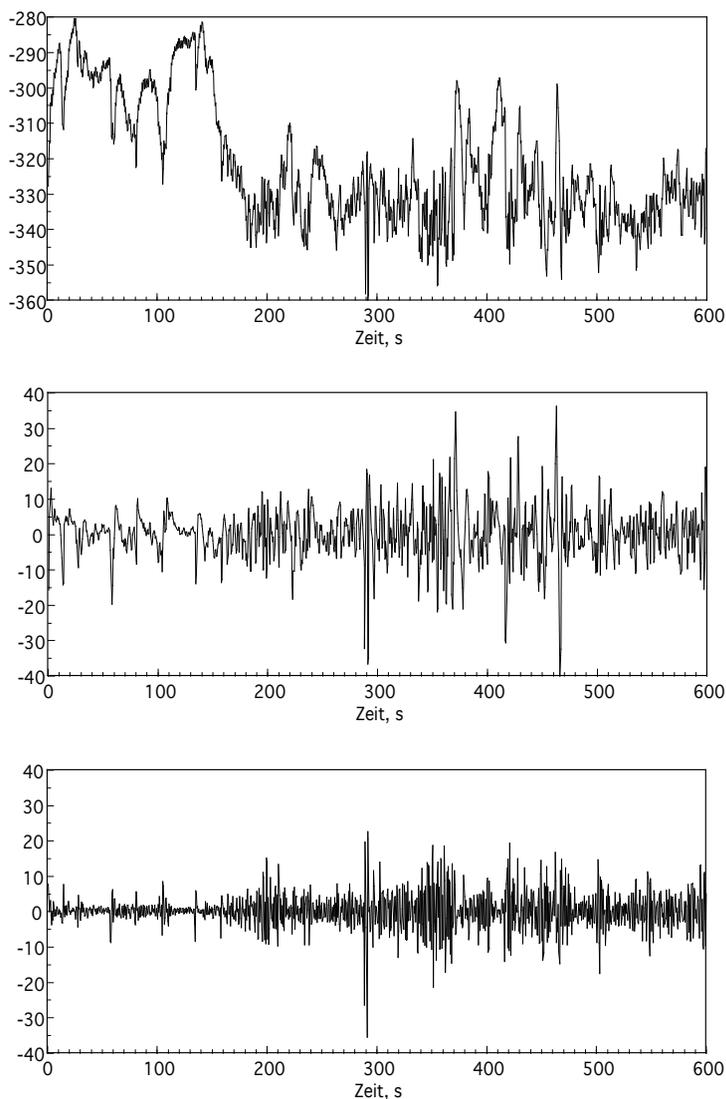


Figura 4. Medidas simultáneas de Ruido electroquímico en diferentes rangos de frecuencia para el sistema: Al99 en una solución Buffer de Ácido Bórico/Borax, pH 6,4; 0,01M NaCl [3]. a) Potencial: 0,02 – 1Hz . b) Ruido electroquímico en potencial: 0,05 – 1Hz. c) Ruido electroquímico en potencial: 0,1- 40Hz

La resolución de las señales de ruido electroquímico depende de la calidad del conversor AD y del rango de medida en corriente seleccionado. La calidad de un conversor AD es un parámetro teórico, y está cuantificado por su ruido propio, el cual quedará inevitablemente registrado dentro de la señal. En general, se debe encontrar una relación óptima entre el rango de medida en corriente (1nA–10mA), la amplificación aplicada, el rango de entrada del sistema de adquisición de datos ($\pm 1,25V - \pm 10V$) y la resolución. Una posibilidad de eliminar interferencias provenientes del sistema de adquisición de datos consiste en realizar en el intervalo de tiempo empleado para la toma de datos un muestreo de alta velocidad y registrar solamente el valor medio. Dicha estrategia se conoce bajo el nombre de *burst-average* y es similar al efecto con el que un filtro *low-pass* puede reprimir el ruido propio del sistema de adquisición de datos.

Además, se debe tener en cuenta que, cuando son empleados altos factores de amplificación, pueden presentarse distorsiones provenientes de los elementos electrónicos de los equipos de medida. Dichos fenómenos pueden minimizarse a través del tratamiento de la señal o a través del aumento o disminución de la cantidad de datos registrados (*spline interpolation*), teniendo en cuenta que la información contenida en la señal no sea falseada o perdida. Por otro lado, el sistema de adquisición de datos se encuentra susceptible a la influencia de variadas señales distorsivas, las cuales provienen en mayor medida de la fuente de energía alterna utilizada para los equipos. Por esto se requiere también el uso de la jaula de Faraday, así como el aislamiento de cables y conexiones para este.

ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE RUIDO ELECTROQUÍMICO

La segunda, e igualmente fundamental, parte de la pregunta planteada corresponde al análisis de la información obtenida a partir de las señales de ruido electroquímico. El análisis visual de los espectros de ruido electroquímico en función del tiempo suele ser la forma más sencilla y rápida de obtener información del sistema y, a través de este, se puede lograr una valoración cualitativa del estado electroquímico del mismo, lo cual, en la mayoría de los casos, requiere de un suficiente conocimiento del sistema investigado. Por lo general, se emplean algunos métodos numéricos que permiten el análisis cuantitativo de dicha información y, con ello, diferencias en el comportamiento de sistemas específicos o de un sistema en cuestión bajo diferentes condiciones.

Dentro de dichos métodos, los más sencillos corresponden a la determinación de parámetros estadísticos, como la desviación estándar. El cálculo

de la desviación estándar permite determinar diferencias en la intensidad de las señales de ruido electroquímico sobre extensas cantidades de datos y está directamente relacionado con cada aplicación específica a través de los intervalos de tiempo empleados para su determinación. En la Figura 5, se observa como, a través de la determinación de la desviación estándar, se puede caracterizar el comportamiento del Aluminio bajo diferentes condiciones de corrosión en intervalos representativos de 10 minutos: inicialmente, en una solución Buffer de pH neutro; luego, tras la adición de NaCl hasta obtener una concentración 0,01M en la solución y, finalmente, al adicionar un inhibidor de corrosión (NaNO_3) hasta una concentración 0,5M en la solución. No obstante, con el simple cálculo de la desviación estándar no se puede establecer si un alto valor para esta corresponde a la presencia de una gran cantidad de eventos (transientes), o a la presencia de pocos de ellos pero de gran magnitud. Esto obliga a realizar, adicionalmente, un conteo de los mismos, para lo cual suele tomarse como referencia un máximo o un mínimo de intensidad.

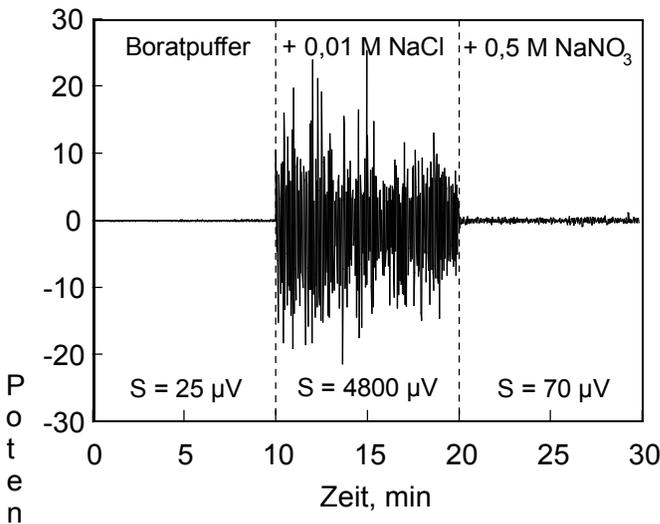
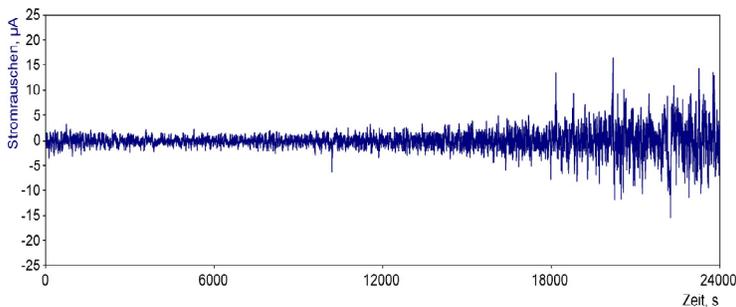


Figura 5. Determinación de la desviación estándar de la señal de ruido electroquímico en potencial para el sistema: Aluminio 99,9 en una solución Buffer de Ácido Bórico/Borax pH 6,4 bajo diferentes condiciones. [3]

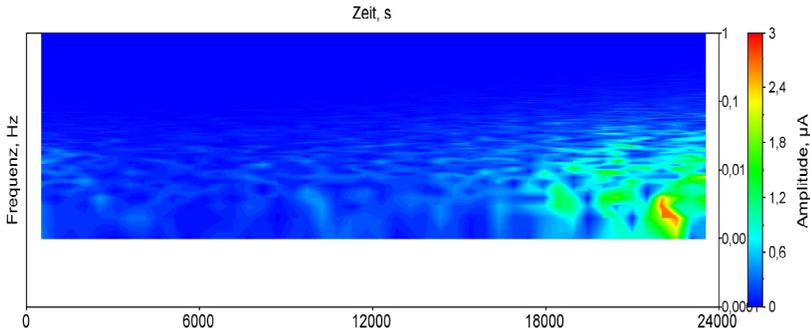
Otra importante forma de extraer información contenida en las señales de ruido electroquímico consiste en realizar un análisis en el dominio de la frecuencia. La señal de ruido electroquímico está compuesta por diferentes frecuencias dependiendo del tipo y cantidad de fuentes de ruido que la

producen y, naturalmente, de los filtros empleados en el acondicionamiento de la misma. Para efectuar dicho análisis, es necesario realizar una transformación de los espectros del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, obteniéndose así la posibilidad de determinar cuáles frecuencias juegan un papel decisivo en la señal y cuales carecen de importancia. A través de estos espectros, también se pueden reconocer señales distorsivas, como, por ejemplo, la proveniente de fuentes de corriente alterna.

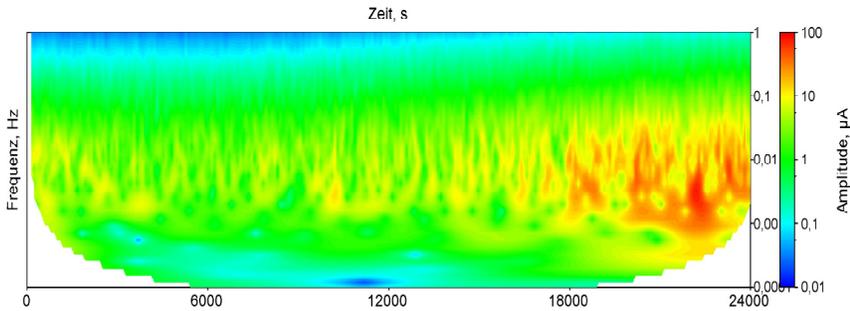
La Transformación Rápida de Fourier (FFT) suele ser el método más sencillo para obtener los espectros en función de la frecuencia. Sin embargo, en realidad este es el método menos adecuado ya que el carácter estocástico (discontinuo, no periódico) de las señales de ruido electroquímico conlleva a que los eventos no puedan ser visualizados en el espectro. Ante esta limitante, surge como alternativa el uso de la transformación conocida como *Short Time Fourier Transformation* (STFT), la cual permite la localización de frecuencias en señales variantes en el tiempo, pero ofrece una muy limitada resolución en frecuencia dependiendo del intervalo de tiempo seleccionado y viceversa (Principio de Indeterminación de Heisenberg). En los últimos años, el uso de la técnica de Wavelet ha ganado un considerable interés por sus importantes ventajas para el análisis de las señales de ruido electroquímico [11, 12], ya que permite la localización simultánea con una buena resolución de las frecuencias contenidas en la señal. La Figura 6 muestra precisamente la buena localización de frecuencias alcanzada mediante el análisis de un espectro de ruido electroquímico con Wavelet.



a) Ruido electroquímico en corriente.



b) Espectro en el dominio de la frecuencia obtenido mediante STFT (Intervalo: 1024s).



c) Espectro en el dominio de la frecuencia obtenido mediante Wavelet (Morlet-Wavelet, Número de Onda=6)

Figura 6. Análisis en el dominio de la frecuencia de un espectro de ruido electroquímico obtenido de un acero de alta aleación ante el aumento de la temperatura en una solución de FeCl_3 [9].

Es importante acotar, para concluir, que, a pesar del acelerado desarrollo en los últimos 40 años de la técnica de ruido electroquímico para el estudio y monitoreo de la corrosión, todavía queda camino por recorrer para lograr un completo entendimiento de la información electroquímica contenida en la señal, cuestión que, en realidad se ha investigado poco. Igualmente, se requiere la unificación de criterios en cuanto a las técnicas de registro y análisis de las señales que permitan mejorar la reproducibilidad y confiabilidad de la técnica. Pese a todo lo anterior, sus claras ventajas frente a las técnicas electroquímicas tradicionales han posicionado la técnica de ruido

electroquímico como la esperanza para alcanzar una mejor comprensión de la corrosión.

CONCLUSIONES

- La técnica de ruido electroquímico permite la determinación de procesos submicroscópicos de nucleación de la corrosión, con extrema sensibilidad y en tiempo real, lo cual, por ser imposible con los métodos electroquímicos tradicionales, abrió una ventana en la investigación y monitoreo de la corrosión.
- El fenómeno del ruido electroquímico es una respuesta espontánea del sistema (no obedece a algún tipo de excitación externa) a los procesos electroquímicos que ocurren en la interfase metal (productos de corrosión) / electrolito involucrados en la corrosión y, por tanto, ocurre aun cuando no se esté midiendo.
- Para efectuar medidas de ruido electroquímico de manera confiable, se deben tener en cuenta importantes consideraciones en cuanto a las posibles interferencias y señales distorsivas que pueden afectar las medidas, las cuales deberán ser indispensablemente minimizadas a través de diferentes estrategias. Así mismo, la aplicación específica de las medidas definirá en gran parte los parámetros de registro y los métodos de tratamiento y análisis de la información obtenida.
- Aun cuando la técnica de ruido electroquímico haya experimentado un acelerado avance en los últimos años, es necesario realizar investigación orientada hacia el total entendimiento de la información electroquímica contenida en la señal, lo cual permitirá en últimas una mejor comprensión de los fenómenos corrosivos.

Referencias

- [1] W. Iverson. "Transient voltage changes produced in corroding metals and alloys", en *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 115, pp. 617-618, 1968.
- [2] V. Tyagai, N. Lukyanchikova. "Electrochemical Noise of iodine reduction on a cadmium sulphide surface", *Surface Science*, Vol. 12, pp. 331-340, 1968.
- [3] J. Goellner. "Elektrochemisches Rauschen bei der Korrosion", *Werkstoffe und Korrosion*, Vol. 55, pp. 727-734, 2004.
- [4] A. Burkert, A. Heyn, J. Goellner. "Rauschdiagnostik bei Korrosionsprozessen Teil 2: Problemanalyse", *Werkstoffe und Korrosion*, Vol. 49, pp. 642-650, 1998.

- [5] A. Legat. "Influence of Electrolyte Movement on Measured Electrochemical Noise", *Corrosion*, Vol. 56, pp. 1086-1092, 2000.
- [6] A. Legat, A. Kranjc. "Electrochemical Noise in various types of electrolyt flow". En Corrosion NACE Expo 2004. New Orleans: Paper N° 04465, 2004.
- [7] H. Bouazaze, S. Cattarin, F. Huet, M. Musiani, R. Nogueira. "Electrochemical noise study of the effect of electrode surface wetting on the evolution of electrolytic hydrogen bubbles", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 597, pp. 60-68, 2006.
- [8] D. Hodgson. "Application of Electrochemical Noise and In situ Microscopy to the study of Bubble evolution on chlorine evolving anodes", *Electrochimica Acta*, Vol. 41, pp. 605-609, 1996.
- [9] A. Heyn. Tesis Doctoral, 2003, "Rauschanalyse des Frühstadiums der Lochkorrosion", 121.
- [10] A. Heyn, J. Goellner, M. Bierwirth, H. Sarmiento Klapper. "Recent Applications of Electrochemical Noise for Corrosion Testing - Benefits and Restrictions". En Corrosion NACE Expo2007, Nashville: Paper N° 07459, 2007.
- [11] B. Joseph, X. Dai, R. Motard, D. Silverman. "Improved Discrimination of Electrochemical Noise Signals using Wavelet Analysis", *Corrosion*, Vol. 57, 2001.
- [12] X. Liu, H. Wang, S. Huang, H. Gu. "Analysis of EN with Wavelet Transform", en *Corrosion*, Vol. 57, pp. 843-852, 2001.