

# Estudio de la Viabilidad de un Sistema de Detección y Caracterización de Metales Disueltos en Soluciones utilizando el Principio de la Permeabilidad Magnética

William Rodríguez\*, Luis Pereira\*, Carlos Hernandez\*<sup>†</sup>, Jackson Rodriguez\*\*, Bernd Friedrich\*\*

\*Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, Colombia

\*\*IME Instituto de Procesos Metalúrgicos y Reciclaje de Metales – Universidad RWTH Aachen, Alemania

**Resumen** — El objetivo principal del presente trabajo estuvo enfocado en determinar la viabilidad técnica de un sistema práctico y novedoso para realizar la detección de metales disueltos presentes en aguas residuales industriales utilizando la permeabilidad magnética como principio de medición. Cumpliendo con la metodología planteada se diseñó e implementó un sensor electromagnético en el Instituto IME en Alemania, el cual permite realizar el monitoreo en línea las aguas residuales durante el tratamiento electroquímico conocido como la electrocoagulación. A partir de los resultados experimentales se estableció la viabilidad técnica de este principio de medición como señal de realimentación que permite la automatización del proceso de la electrocoagulación para el tratamiento de las aguas residuales industriales.

**Palabras clave** — Electrocoagulación, espectrometría de absorción atómica AAS, permeabilidad magnética, plasma de acople inductivo ICP, sensor de realimentación, tratamiento de aguas residuales.

## I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo estuvo enfocado en la exploración de una nueva técnica basada en el concepto de transporte de flujo magnético, capaz de determinar la concentración iónica de metales disueltos presentes en efluentes industriales, ofreciendo así información digital y en tiempo real para realizar el monitoreo y control en línea del proceso de electrocoagulación para el tratamiento de las aguas residuales industriales. Los resultados del presente estudio confirman la permeabilidad magnética como principio de medición para la detección de contenido metálico disuelto. En este proyecto se desarrolló un sensor prototipo el cual implementado industrialmente, permite determinar en tiempo real el nivel de contaminación de las aguas residuales industriales.

Este trabajo se adelantó en cooperación internacional con el *Instituto de Procesos Metalúrgicos – IME* de la *Universidad RWTH Aachen* en Alemania, financiado a través del convenio “PROCOL” Colaboración Científica-Académica Colombo-Alemana establecido entre el *Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y Tecnología “Francisco José de Caldas” – COLCIENCIAS* y el *Servicio de Intercambio Académico Alemán – DAAD*.

La metodología propuesta a continuación ofrece un soporte adicional a las técnicas que actualmente son utilizadas para la protección ambiental en términos de detección en tiempo real de metales en aguas residuales tratadas, a su vez que el sensor contribuye al proceso de optimización de la electrocoagulación permitiendo un control de bucle cerrado.

## II. SISTEMAS ACTUALES EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

El método convencional recibe el nombre de precipitación química y es ampliamente utilizado en las industrias con el fin de remover los metales disueltos provenientes de procesos metalúrgicos. Su principio de funcionamiento está basado en la precipitación de los metales disueltos variando el pH de la solución. Generalmente las aguas industriales se encuentran en un pH ácido (en el rango de 2 a 3), ejerciendo una disolución total de los metales y algunas otras impurezas en la solución. La neutralización de estas soluciones se logra por medio de la adición de bases o álcalis, tales como el hidróxido de sodio NaOH o el hidróxido de calcio Ca(OH)<sub>2</sub>.

---

<sup>†</sup> Autor al que se le dirige la correspondencia:

Tel. (+57) 7 6796220 Ext. 203. Fax (+57) 7 6796221.

E-mail: [chernandez@upbga.edu.co](mailto:chernandez@upbga.edu.co)

De esta manera, a medida que aumenta el pH de la solución se observa la formación de pequeños grumos o coágulos, los cuales ejercen la precipitación del material disuelto en la solución, usualmente en un valor de pH básico superior a 9 [1].

La mayor desventaja que presenta este método radica en la imposibilidad de la reutilización de los efluentes tratados debido a problemas de corrosión y/o taponamiento, causados por elementos como el sodio o el calcio que permanecen disueltos al final del tratamiento. La remoción de estos elementos es compleja y muy costosa, razón por la cual la industria no recicla el agua residual.

Fig. 1 muestra el proceso de precipitación química el cual involucra el sensor de pH que entrega la información necesaria para controlar la dosificación de los álcalis (NaOH). En el reactor se encuentra un agitador que permite la mezcla homogénea de los álcalis con el agua residual.

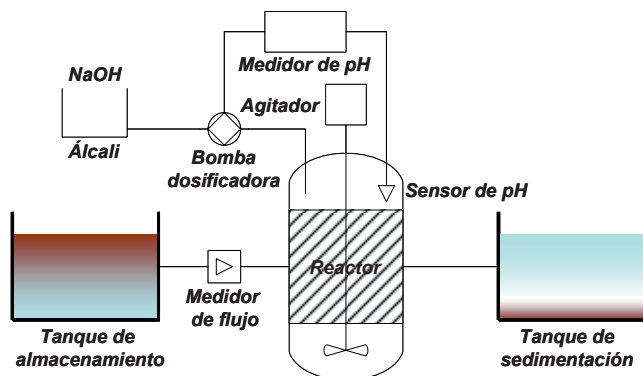


Fig. 1. Esquema de proceso de precipitación química.

Por otra parte, el método de la electrocoagulación permite la remoción más eficiente de metales, puesto que realiza dos procesos simultáneos. El primer proceso es la formación de un hidróxido metálico que permite la precipitación de los metales y otras impurezas en un rango neutro (entre 6 y 7), debido al proceso de hidrólisis que se presenta en el ánodo. El segundo proceso es la electrodeposición de metales en la superficie del cátodo, producto de la formación de gas hidrógeno [2]. A diferencia del tratamiento convencional, la electrocoagulación permite el reciclaje de gran cantidad de estos metales y no utiliza agentes químicos para la remoción de impurezas disueltas en el agua residual industrial, lo cual permite la reutilización del agua en la industria [3].

Por esta razón la electrocoagulación se presenta como una tecnología viable para el desarrollo sostenible en las industrias, puesto que permite reducir el consumo de agua potable, a su vez que puede ser operada con energías renovables como la solar [3]. Fig. 2 ilustra el proceso de electrocoagulación conformado por la fuente de corriente que suministra la potencia a los electrodos presentes en el reactor, así como la integración del sensor electromagnético a la unidad de control que regula la demanda de energía.

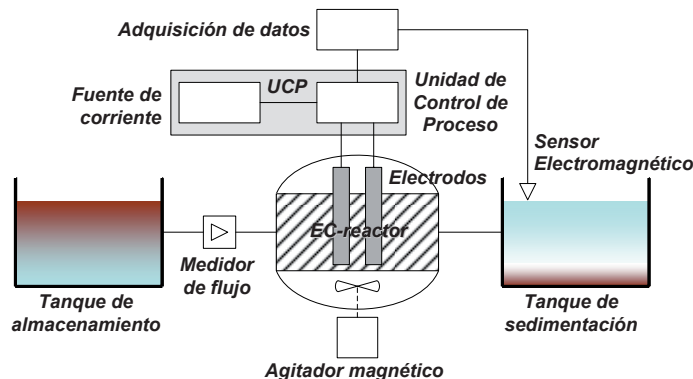


Fig. 2. Esquema de proceso de electrocoagulación

### III. METODOLOGÍA

Durante el desarrollo de este trabajo de investigación se llevaron a cabo las siguientes actividades:

#### A. Recopilación, análisis e incorporación del conocimiento

Se consultó, validó y clasificó la información obtenida a través de libros, revistas, patentes, docentes, personal de laboratorios de química y plantas de tratamiento de aguas residuales. Esta primera actividad se enfocó en temas relacionados a la presencia de metales en recursos hídricos, que afectan la salud de los seres vivos, así como los métodos e instrumentos utilizados actualmente para la detección y caracterización de los metales en una solución, con el fin de establecer variables que pudieran tener influencia sobre la permeabilidad magnética.

#### B. Diseño y construcción del dispositivo

Durante esta fase experimental se definió un prototipo que permitió evaluar y caracterizar las soluciones sintéticas y aguas industriales con diferentes concentraciones de metales disueltos (Cu, Ni, Zn).

Inicialmente se construyeron varios prototipos con los cuales se realizaron las pruebas preliminares hasta establecer el prototipo adecuado que permitió confirmar la viabilidad técnica de la permeabilidad magnética como sistema de detección del contenido iónico presente en las aguas residuales industriales. Para la etapa de diseño y construcción del sensor fue necesario considerar las siguientes características:

El dispositivo debía estar en capacidad de realizar el monitoreo para el control en línea del proceso de tratamiento del agua residual, permitiendo el flujo continuo del agua a través del mismo. El sensor debía ser no invasivo, es decir, no debía existir un contacto físico con la solución que fomentara una reacción de tipo químico y que pudiese influenciar de alguna manera el muestreo. El dispositivo debía ser versátil al igual que el módulo de electrocoagulación, en otras palabras pequeño y de fácil movilidad. Debía contar además con interfaz de comunicación a un computador para la captura y evaluación de parámetros en formato digital. Considerando las características mencionadas anteriormente, se planteó una serie de prototipos preliminares, hasta llegar al dispositivo final que se muestra en la Fig.3.

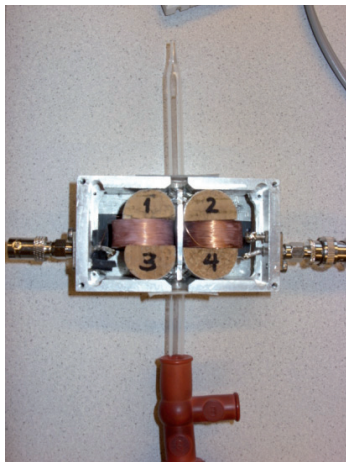


Fig. 3. Dispositivo para la detección de metales disueltos

Con el fin de eliminar las perturbaciones electromagnéticas se diseñó una caja metálica fabricada en aluminio que cubre totalmente el dispositivo como se muestra en la Fig. 3. Esta caja es conocida como “la jaula de Faraday”. Ésta permite un apantallamiento perfecto de las señales electromagnéticas que se encuentran viajando libremente por el espacio, evitando que estas ondas se infiltren en el dispositivo e interfieran de esta forma con la medición.

Se diseñó un prototipo basado en el principio de un transformador eléctrico convencional (Fig. 4), el cual en lugar de contar con un núcleo de hierro posee un núcleo hueco de vidrio donde se deposita el agua residual (Fig. 5).

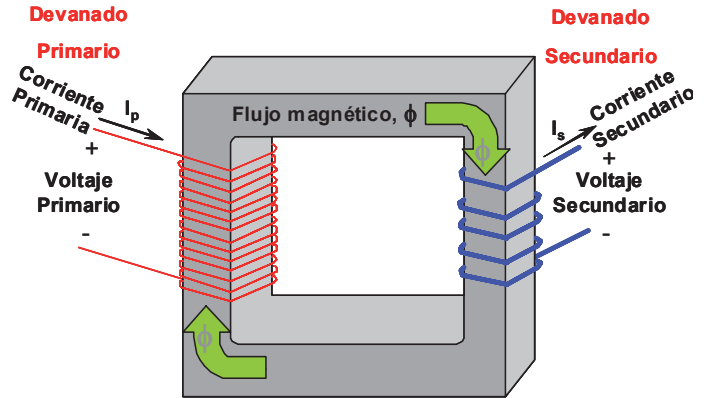


Fig. 4. Transformador eléctrico convencional

En una bobina, el valor de la inductancia esta determinado exclusivamente por las características geométricas y la permeabilidad magnética del espacio donde se encuentra. Es así que para una bobina tipo solenoide, de acuerdo con las ecuaciones de Maxwell, la inductancia viene determinada por:

$$L = (\mu * N^2 * A) / l \quad (1)$$

En la ecuación 1,  $\mu$  es la permeabilidad absoluta del núcleo =  $\mu_0 * \mu_r$ , siendo  $\mu_0$  la permeabilidad del vacío y  $\mu_r$  la permeabilidad relativa que depende del material del cual está conformado el núcleo,  $N$  es el número de espiras,  $A$  es el área de la sección transversal del bobinado y  $l$  la longitud de las líneas de flujo [4]. En el caso particular que varíe el material del núcleo, cualquier cambio en el flujo magnético presente se debe al cambio en la permeabilidad magnética puesto que el área de la sección transversal, el número de espiras y la longitud de la bobina permanecen constantes.

Con respecto a la Fig. 5, la corriente  $I_{1n}$  que fluye en una bobina establece un campo magnético entorno a la misma y alrededor también de una segunda bobina cercana. El flujo variable en el tiempo que rodea a la segunda bobina produce una tensión en sus terminales, proporcional a la tasa de cambio de la corriente en el tiempo que fluye por la primera bobina. Según se describe en la ecuación 2:

$$V = M * \frac{dI_{in}(t)}{dt} \quad (2)$$

Siendo  $V$  el voltaje en las terminales de la bobina 2,  $M$  la inductancia mutua e  $I_{in}(t)$  la corriente que circula por la bobina 1.

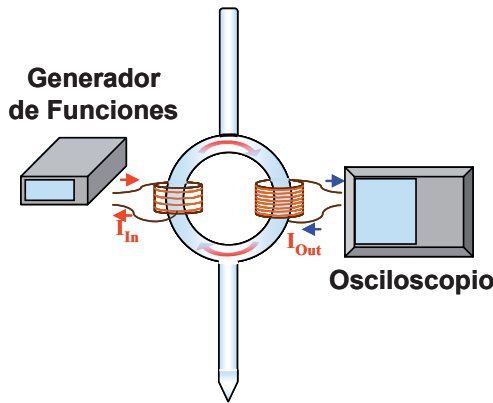


Fig. 5. Esquema del prototipo implementado

La inductancia mutua se mide en Henrios, y al igual que la resistencia y la capacitancia es una cantidad positiva. Sin embargo en algunos casos la tensión  $M*(di(t)/dt)$ , aparece como una cantidad positiva o negativa según crezca o no la corriente en un instante específico.

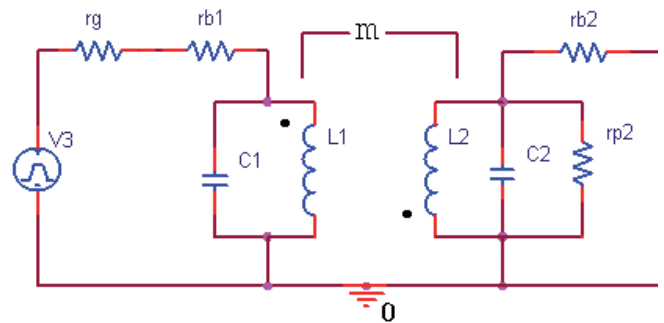
El grado con el cual  $M$  se acerca a su valor máximo se describe en la ecuación 3, mediante el coeficiente de acoplamiento:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L1 * L2}} \quad (3)$$

Puesto que  $M < (L1 * L2) / 2$  entonces  $0 < k < 1$ .

Los valores de acoplamiento mas grandes se obtienen con bobinas que están físicamente más cercanas, las que se devanan para proporcionar un flujo magnético común mayor, o que se les fija una trayectoria común a través de un material que sirve para concentrar y localizar el flujo magnético (un material de alta permeabilidad) [5]. En el caso que exista un acoplamiento total entre las bobinas  $k = 1$  y en el que las reactancias inductivas del primario como del secundario sean muy grandes en comparación con las impedancias de terminación, se dice que se tiene un transformador ideal. Tales características se obtienen utilizando un núcleo de hierro, sobre un intervalo razonable de frecuencias para un intervalo razonable de impedancias a nivel terminal.

En un transformador real se deben añadir los efectos de la resistencia finita de las bobinas, así como las pérdidas óhmicas en el núcleo. Cuando se está trabajando con núcleos no ferromagnéticos, es necesario incluir la inductancia mutua. Para las frecuencias de trabajo que están en el rango de la radiofrecuencia, es necesario tener en cuenta las capacitancias parásitas. Un diagrama circuital que describe los componentes para el caso particular que se está trabajando se muestra en la Fig. 6.



- $rg$  = Resistencia interna del generador
- $rb1$  = Resistencia de la bobina primaria
- $rb2$  = Resistencia de la bobina secundaria
- $rp2$  = Resistencia del núcleo.
- $L1$  = Inductancia de la bobina primaria
- $L2$  = Inductancia de la bobina secundaria
- $C1$  = Capacitancia parásita de la bobina primaria
- $C2$  = Capacitancia parásita de la bobina secundaria
- $m$  = Inductancia mutua
- $v3$  = Voltaje aplicado a la bobina primaria.

Fig. 6. Diagrama circuital del transformador real

Con base en el modelo matemático para el transformador real planteado anteriormente, se propuso el modelo del prototipo, el cual por razones de validación, debe incluir la impedancia de las puntas de prueba del osciloscopio. Fig. 7 describe el circuito que representa al dispositivo final. Los cuadros rojos hacen referencia a la impedancia de cada punta de prueba, siendo  $ro1$  y  $ro2$  las resistencias de entrada de cada canal del osciloscopio.

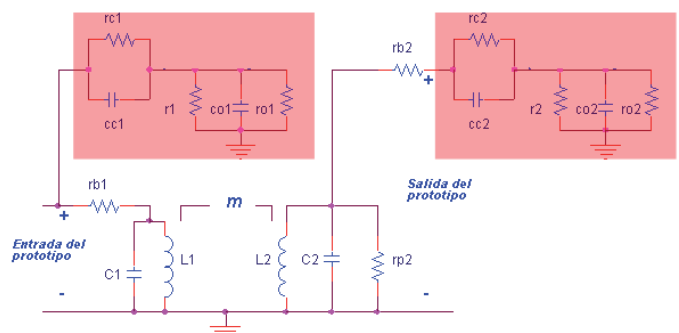


Fig. 7. Circuito eléctrico del dispositivo final



C. Toma de datos y evaluación del dispositivo

Para verificar la repetibilidad en las medidas y confiabilidad del sensor, se llevó a cabo la automatización de la adquisición de los datos. Para esto se desarrolló un programa computacional en Visual Basic que permitió controlar las funciones del generador y del osciloscopio logrando además la captura y almacenamiento de los datos para ser visualizados gráficamente en el computador, facilitando la interpretación de las mediciones. Se emplearon instrumentos de laboratorio necesarios para la medición de parámetros electroquímicos tales como el pH y la conductividad. También se usaron sales metálicas para la preparación de las muestras sintéticas.

Con el fin de validar los resultados de las mediciones, se emplearon equipos especializados para la detección de elementos en soluciones acuosas como el AAS (*Atomic Absorption Spectroscopy*) y el ICP (*Inductively Coupled Plasma*). Se estableció una relación entre la respuesta obtenida del sensor electromagnético y el contenido metálico de la muestra obtenido por medio del ICP. A partir de esta relación se confirmó la viabilidad del dispositivo implementado en la detección de contenido metálico en aguas residuales y su posible aplicación en el proceso de electrocoagulación. Se desarrolló una metodología de trabajo basada en la investigación empírica, la cual comprende el muestreo, la adquisición y la tabulación de los datos para su posterior análisis e interpretación como se muestra en Fig. 8. Fig. 9 presenta la interfaz gráfica de usuario GUI del programa implementado en Microsoft Excel.

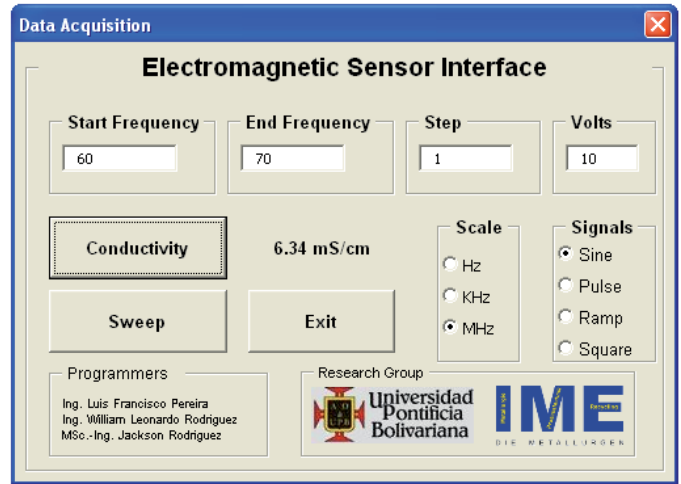


Fig. 9. Interfaz gráfica de usuario

IV. RESULTADOS

Durante el desarrollo de este proyecto se realizaron diversos tipos de pruebas, las cuales ayudaron a determinar la selectividad y confiabilidad del sensor electromagnético propuesto. En la Fig. 10 se aprecia un barrido en frecuencia realizado con soluciones sintéticas de Cu, Ni y Zn en concentraciones de 1, 10, 100 y 1000 mg/l.

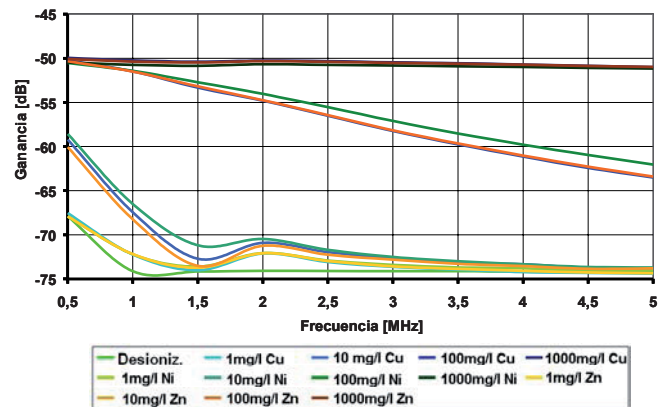


Fig. 10. Barrido en frecuencia con aguas sintéticas

En la Fig. 10, se puede apreciar una relación entre la ganancia medida en decibeles (dB) y la concentración de metales presentes en cada una de las muestras de 1, 10, 100 y 1000 mg/l de Cu, Ni y Zn. El barrido en frecuencia está en el rango de 500 KHz. y 5 MHz. La curva inferior representa la respuesta del sistema con agua desionizada. Se nota una relación de ganancia proporcional entre las diferentes concentraciones. Esto evidencia la dependencia del contenido iónico de la muestra con respecto al flujo magnético medido con este sensor.

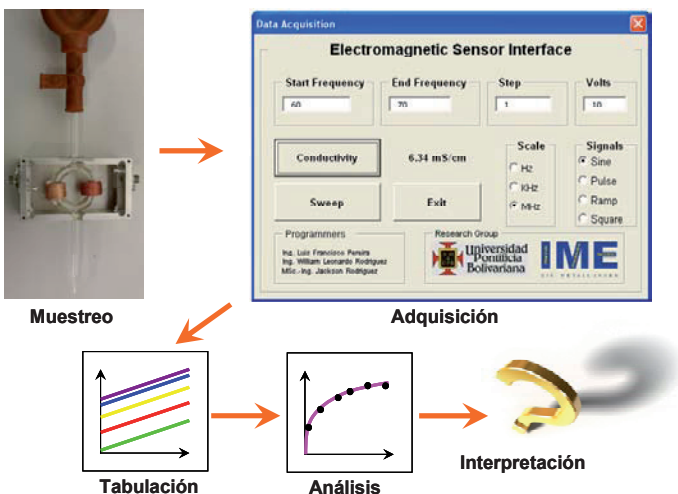


Fig. 8. Metodología empleada en investigación empírica

Fig. 11 presenta la respuesta del sistema para una muestra con agua residual industrial antes y después del tratamiento por electrocoagulación. A partir de la concentración presente en la muestra, es posible apreciar la relación entre el contenido metálico y la ganancia medida por el sensor electromagnético.

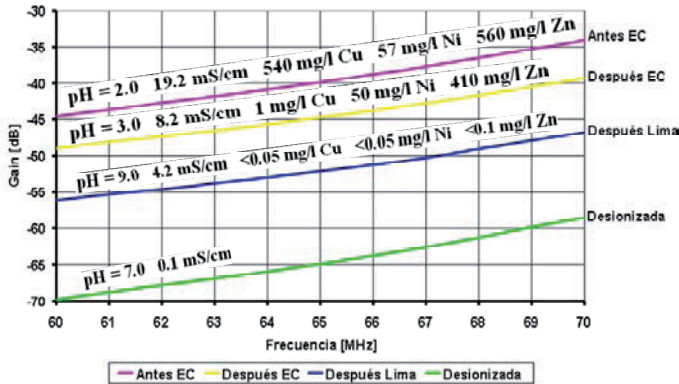


Fig. 11. Barrido en frecuencia con agua industrial

En la Fig. 11 se aprecia que la señal obtenida antes del proceso de electrocoagulación, representada por la primera línea en orden descendente, presenta la mayor ganancia debida a la alta concentración de metales disueltos, cerca de medio gramo por litro de cobre y zinc. Así mismo es posible apreciar que a medida que disminuye la concentración de metales disueltos en la solución, después del tratamiento por electrocoagulación (pH=3), y precipitación química (pH=9) con hidróxido de calcio  $Ca(OH)_2$ , se aprecia una disminución proporcional de la ganancia.

A juzgar por el valor de la conductividad del agua desionizada, representada por la primera línea en orden ascendente, se puede apreciar la relación entre la ausencia de iones y la respuesta del sensor. A partir del valor de conductividad obtenido antes (19.2 mS/cm) y después de la remoción selectiva del cobre (8.2 mS/cm) por medio de la electrocoagulación, se plantea una metodología de control basada en un sistema experto que permita realizar el monitoreo en línea del proceso. Una vez observada la estrecha relación entre la señal medida por el dispositivo y la conductividad eléctrica, se procedió a preparar 20 soluciones a base de cloruro de sodio NaCl con valores de conductividad definidas entre 1 y 20 mS/cm, con el fin de comprobar la relación entre la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética. Fig. 12 presenta los resultados obtenidos.

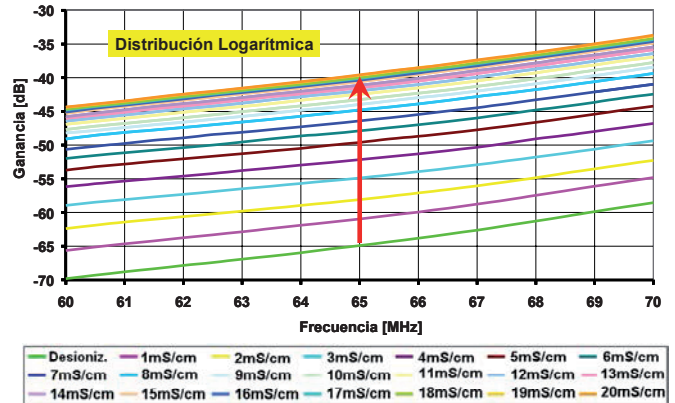


Fig. 12. Barrido en frecuencia con soluciones de NaCl.

En la Fig. 12 se observa una distribución logarítmica de las señales en sentido vertical. Analizando las señales a una determinada frecuencia y extrapolar los datos en función de la conductividad como se muestra en la Fig. 13, se comprobó una relación exponencial entre la conductividad y la señal de ganancia obtenida con el sensor electromagnético.

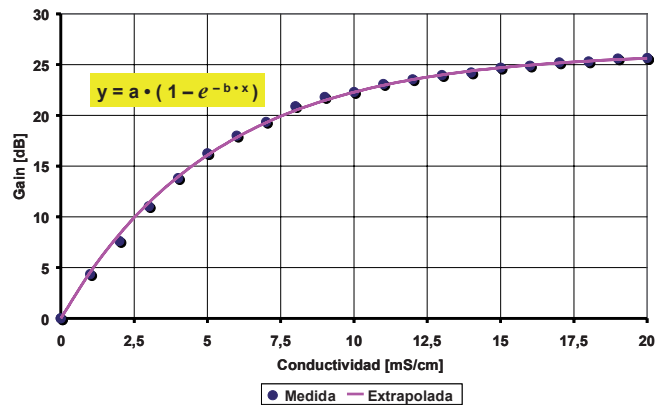


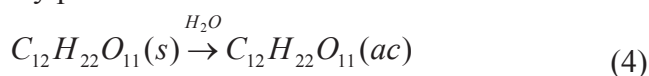
Fig. 13. Señal de ganancia vs. conductividad eléctrica

En la Fig. 13, los datos obtenidos de forma experimental están representados por un ordenamiento de puntos, los cuales permiten extrapolar un comportamiento de tipo exponencial. Teniendo en cuenta esta respuesta del sistema, se programó un macro en Excel que permitió determinar las variables a y b de la ecuación mediante el uso de métodos iterativos.

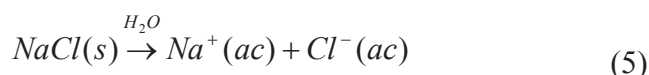
## V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El desarrollo de la última etapa del proyecto permitió concluir con la respuesta logarítmica del sistema (ver Fig. 13), la cual mide el nivel de conductividad presente en la solución analizada e indirectamente actúa como un indicador del nivel de contaminación por metales disueltos en el agua residual.

Un análisis químico revela que cuando se disuelven los sólidos, con frecuencia se desintegran para formar principalmente las moléculas o los iones que los constituyen. Como se expresa en la ecuación 4, la mayor parte de los solutos moleculares se disuelven y producen las moléculas individuales:



Y los sólidos iónicos se disocian y forman soluciones de los iones positivos y negativos que los forman. Ecuación 5:



Los solutos como el NaCl que se disuelven por completo en iones, se denominan electrólitos fuertes. Los solutos, como la sacarosa, que no se disuelven formando iones, se denominan no electrólitos. Hay algunos solutos que se disuelven en forma parcial en iones, y en forma parcial en moléculas solubles; a estos se les denomina electrólitos débiles [6].

Cuando se disuelve un sólido iónico en una solución acuosa, los iones positivos y negativos que se producen tienen libertad de movimiento en ella. Fig. 14 presenta la respuesta de la conductividad del agua en la presencia de pequeñas cantidades de *Cloruro de Plata* AgCl [6].

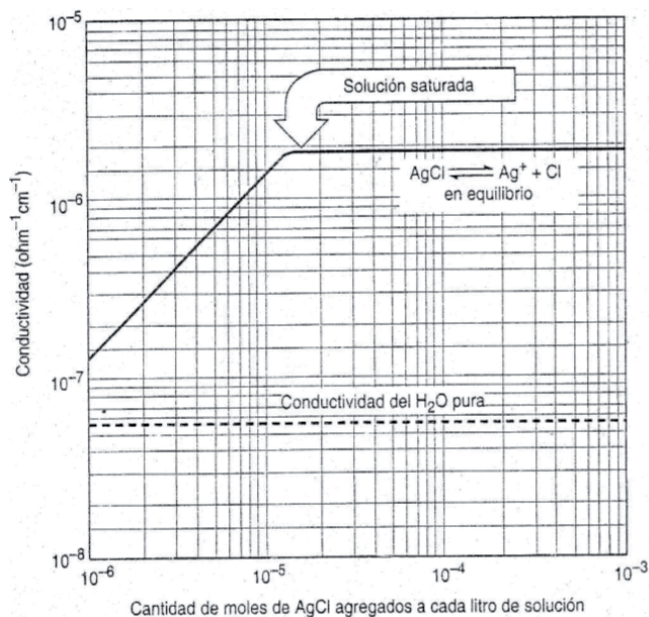


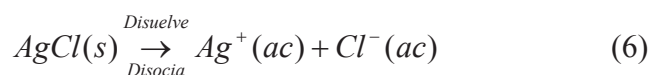
Fig. 14. Conductividad vs. Concentración de AgCl

Un sistema conformado por una bombilla unida a dos electrodos sumergidos en una solución conduce a una corriente eléctrica muy pequeña, aun antes de agregar AgCl, porque hay pequeñas cantidades de iones  $H_3O^+$  y  $OH^-$  en el agua. La solución incrementa su conductividad cuando se le agrega AgCl, porque parte de la sal se disuelve y forma iones  $Ag^+$  y  $Cl^-$ , los cuales conducen la corriente eléctrica por la solución. La conductividad incrementa a medida que se agrega más AgCl, hasta llegar a unos 2 mg de sal disuelta por litro de solución [6].

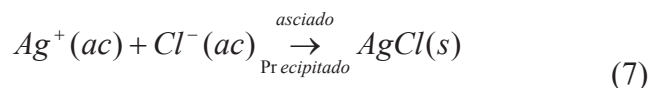
El hecho que la conductividad no aumente después que la solución llegó a la concentración de 2 mg de AgCl/L indica que hay un límite de la solubilidad en este caso. Una vez que la solución llega al límite no se disuelve más AgCl, independientemente de cuanto sólido se agregue al sistema. Es exactamente si la conductividad del AgCl está controlada por un equilibrio. Una vez que la solución llegue al equilibrio la rapidez con que se disuelve el AgCl y forma iones  $Ag^+$  y  $Cl^-$  es igual a la rapidez con la que se combinan para formar AgCl [6].

Las pruebas que respaldan esta solución se ven en la Fig. 15., donde se muestra lo que sucede con la conductividad del agua cuando se agrega cloruro de plata sólido en exceso. Cuando se comienza a agregar esta sal, se disuelve y se disocia con rapidez (ecuación 6). De esta manera, la conductividad de la solución se incrementa con rapidez al principio.

Las concentraciones de los iones incrementan de modo tal que la reacción inversa empieza a competir con la reacción directa, y esto origina una disminución de la rapidez con la que los iones de  $Ag^+$  y  $Cl^-$  entran en la solución.



La reacción inversa es la formación de cloruro de plata insoluble (ecuación 7). Las reacciones en las que las especies solubles forman un soluto insoluble se llaman reacciones de precipitación. [6]





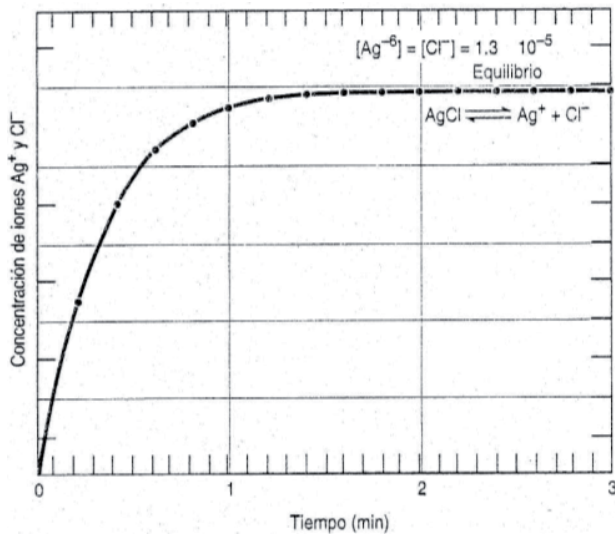
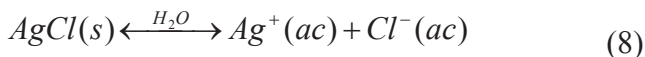


Fig. 15. Concentración de iones de  $Ag^+$  y  $Cl^-$  vs. Tiempo

Al final, las concentraciones de  $Ag^+$  y  $Cl^-$  son suficientemente grandes para que la rapidez de precipitación compense exactamente la rapidez de disolución del  $AgCl$ . Una vez que esto sucede no hay cambio de concentración de iones a través del tiempo, y la reacción está en equilibrio.

Cuando el sistema llega al equilibrio forma una solución saturada, porque contiene la concentración máxima de iones o moléculas que puede existir en equilibrio con la sal o la sustancia sólida a determinada temperatura (ecuación 8). La cantidad de sal que debe agregar a determinado volumen de solvente para formar una solución saturada se llama solubilidad de la sal [6].



La Fig. 11 muestra el nivel de conductividad para el agua residual industrial antes del tratamiento. Este es el mayor nivel de contaminación que se presentará en el agua cuando se desarrolle el mismo proceso en la empresa. Este resultado indica que se puede construir la relación contaminante metálico vs. Conductividad, debido a que el mayor nivel de contaminación encontrado en las aguas industriales no supera los 20 mS/cm, es decir que las aguas que se desean tratar se encuentran de acuerdo a la Fig. 13 en un rango de no saturación.

## VI. HIPÓTESIS PROPUESTA

Haciendo un estudio más detallado sobre el efecto que produce el flujo de electrones a través de una bobina arrollada en forma de solenoide, desde la teoría electromagnética se describe la formación de un campo electromagnético uniforme en el interior de esta.

Dado que la longitud es inferior al diámetro del devanado, el campo magnético se presenta con mayor intensidad en el eje de la bobina, generando un vector de campo magnético  $B$ , paralelo al eje concéntrico de la bobina. El contenido iónico presente en la solución es entonces perturbado por la presencia del campo magnético, reagrupando así los iones dentro de la solución de acuerdo a sus propiedades electromagnéticas inherentes.

De esta manera se propone una teoría que plantea que los materiales con mayor afinidad magnética, como es el caso de los ferromagnéticos, serán fuertemente atraídos hacia el centro de la bobina y alrededor de estos iones se reagruparán los iones con propiedades paramagnéticas y alrededor de estos se encontrarán elementos diamagnéticos como el agua.

Este ordenamiento iónico puede ser descrito como un hilo conductor infinitesimal concéntrico al núcleo de vidrio. Este hilo conductor promueve la presencia del flujo magnético a través del núcleo diamagnético formado en su mayor parte por agua, el cual por sus propiedades diamagnéticas no esta en capacidad de promover el flujo magnético, como se pudo apreciar desde la parte experimental con el agua desionizada.

Fig. 16 presenta una descripción gráfica de la hipótesis planteada con la reagrupación del contenido iónico al interior de la muestra, basado en el efecto que ejerce el vector gradiente del campo magnético al interior de la estructura del toroide.



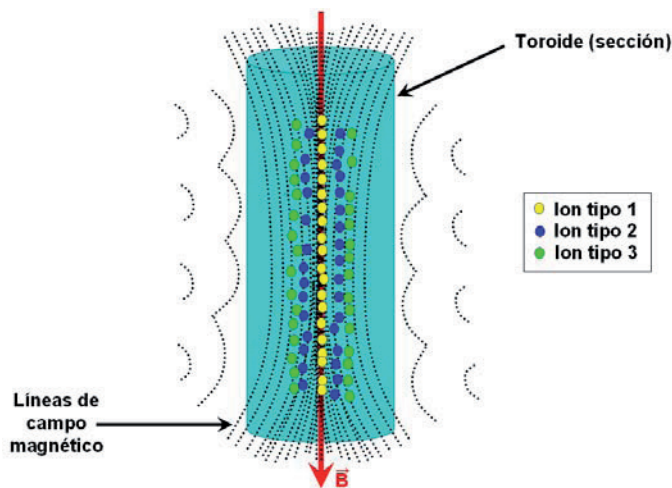


Fig. 16. Hipótesis para el transporte de flujo magnético

## VII. CONCLUSIONES

Desde el punto de vista experimental, la permeabilidad magnética y la conductividad eléctrica guardan una relación directamente proporcional, a nivel de iones. La conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética proporcionan una indicación directa del contenido iónico total presente en la muestra.

A pesar que la permeabilidad magnética no permite una medición selectiva del contenido metálico disuelto en la muestra a baja frecuencia (MHz), para aplicaciones específicas como el monitoreo del nivel de contaminación de metales en el tratamiento de las aguas residuales, donde la composición de los efluentes es conocida e invariable, es posible desarrollar una metodología de control por medio de un sistema experto que permita el control de procesos en tiempo real y una protección en línea más eficaz para la protección del medio ambiente.

Considerando las ventajas que ofrece este método de medición no invasivo, el desarrollo de este sensor y su posterior implementación en una estrategia de control de bucle cerrado permitirá reducir el consumo de energía y la pasivación de los electrodos utilizados en el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de las aguas residuales industriales.

## AGRADECIMIENTO

Agradecemos a COLCIENCIAS y al Servicio de Intercambio Académico Alemán DAAD por el soporte financiero en el proyecto PROCOL, así como al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial MAVDT y al Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas IPSE, por el interés y el apoyo técnico a nuestro trabajo de investigación.

Al personal del laboratorio de química y del taller de mecánica del Instituto de Procesos Metalúrgicos IME de Alemania, por poner a disposición del proyecto sus recursos técnicos y humanos.

A la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga, por la capacitación brindada en sus diferentes áreas y el uso de sus laboratorios de tratamiento de aguas residuales.

Al Dr. Héctor Ramiro Pérez Rodríguez director general de investigaciones, a María Kopytko y Martha Mantilla, docentes de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, por su apoyo científico.

## REFERENCIAS

- [1] Rodríguez J. (2007) Análisis tecno-económico de la electrocoagulación para el tratamiento sostenible de las aguas residuales. *Tesis de maestría, Instituto de Procesos Metalúrgicos y Reciclaje de Metales IME – RWTH Aachen*
- [2] Rodríguez J., Kölle U., Friedrich B. (2008) Producción de hidrógeno a partir del tratamiento electroquímico del agua residual industrial usando la electrocoagulación. *4to. Congreso Alemán del Hidrógeno, Alemania.*
- [3] Rodríguez J, Stopic S, Krause G, Friedrich B (2007): Feasibility Assessment of Electrocoagulation towards a New Sustainable Wastewater Treatment. *Env Sci Pollut Res*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/espr2007.05.424>
- [4] Tipler P., Física para la ciencia y la tecnología, Quinta edición, Editorial reverté. Barcelona España.
- [5] Hayt W., Análisis de circuitos en ingeniería, Quinta edición, McGrawHill.
- [6] Spencer J., Química: Estructura y dinámica, Editorial CECSA

## SOBRE LOS AUTORES

**Cand.-Ing. William Leonardo Rodríguez Galvis**



Candidato a Ingeniero de la Facultad de Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana UPB Seccional Bucaramanga.

**Cand.-Ing. Luis Francisco Pereira Florez**



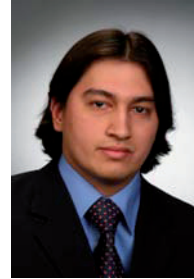
Candidato a Ingeniero de la Facultad de Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana UPB Seccional Bucaramanga.

**Ing. Carlos Gerardo Hernández Capacho**



Docente de la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana UPB Seccional Bucaramanga.

**MSc.-Ing. Jackson Rodríguez**



Ingeniero científico del Instituto de Procesos Metalúrgicos y Reciclaje de Metales IME y candidato a PhD. de la Universidad RWTH Aachen.

**Prof. Dr.-Ing. Bernd Friedrich**



Director del Instituto de Procesos Metalúrgicos y Reciclaje de Metales IME de la Universidad RWTH Aachen.