

## Influencia de la relación $CN^-/Cu^+$ y el sustrato en la oxidación catalizada de cianuros por iones cobre.

Víctor E. Reyes Cruz\*, María Aurora Veloz Rodríguez.

*Centro de Investigación de Materiales y Metalurgia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.*

[vreyes@uaeh.reduaeh.mx](mailto:vreyes@uaeh.reduaeh.mx)

I. González

*Departamento de Química, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.*

### RESUMEN

Los estudios voltamperométricos de una solución cianurada que contiene Cu(I) sobre Carbón Vítreo (CV), Acero Inoxidable y Ti, muestran que la relación molar  $CN^-/Cu^+$  y el sustrato, juegan un papel importante en la oxidación catalítica de cianuros que ocurre por un mecanismo que involucra especies adsorbidas de  $CN^-$ , Cu(I) y Cu(II). El análisis voltamperométrico con diferentes relaciones  $CN^-/Cu^+$  muestra que esta relación modifica tanto el proceso catalítico de oxidación de cianuros, como las especies adsorbidas que intervienen en el mecanismo. De esta manera, se corrobora que las especies adsorbidas que controlan la oxidación del cianuro en el VC son el  $Cu(I)_{ads}$  y  $Cu(II)_{ads}$ ; mientras que en los sustratos metálicos (Acero Inoxidable y Ti) la oxidación catalítica del cianuro está controlada por la especie adsorbidas de  $CN^-_{ads}$  cobre. En ambos casos, se requiere la especie adsorbida Cu(I) sobre el electrodo para llevar a cabo la oxidación catalítica de  $CN^-$ .

## 1. INTRODUCCIÓN

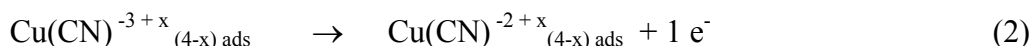
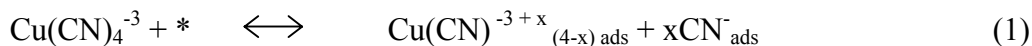
Con el objetivo de reducir el uso de los iones cianuro para la extracción de metales preciosos se han propuesto procesos alternativos de lixiviación (Pyper y col., 1981; Lamb, 1982; Oropeza, 1991; Palomar, 1991; Oropeza y col., 1991; Han K.N. y col., 1992; Wang, 1992; Dadgar y col., 1992.), entre los cuales se encuentran los sistemas de lixiviación: con halogenuros ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$  y  $\text{I}^-$ ), con tiosulfato, con amonico y con tiourea. Sin embargo, el cianuro sigue siendo un agente complejante cuya selectividad con oro y plata, que ha garantiza la rentabilidad de los procesos de extracción que actualmente operan en la industria hidrometalúrgica.

Recientemente un estudio de lixiviación de minerales de palta con tiourea Electro-oxidada (López, 2003) ha mostrado que pueden competir con la selectividad y rentabilidad del procesos de lixiviación con cianuros. Ante esta situación, la destrucción del cianuro resultará ser uno de los procesos importantes para la industria hidrometalurgica, ya que la toxicidad de este ion es muy alta y las restricciones ambientales exigen un tratamiento de estas soluciones antes de desecharlas.

La adición de  $\text{HClO}$  ó  $\text{H}_2\text{O}_2$  son algunos de los procesos de oxidación más conocidos para eliminar cianuro de una disolución, dando como producto el ion cianato,  $\text{CNO}^-$  (Ramaldo, 1983; Eckenfelder, 1989). El tratamiento con peróxido de hidrógeno es más eficiente en presencia del catalizador heterogéneo  $\text{Ru/MgO}$ , pero tiende a producir reacciones explosivas (Park, 1997); mientras que el tratamiento con  $\text{HClO}$  produce sustancias volátiles tóxicas. La oxidación de cianuros catalizada por metales de transición ha sido objeto de varios estudios. La oxidación de cianuros mediante el uso de ánodos de Carbón Vítreo recubiertos con plomo muestran que el mecanismo va vía homogénea (Tissot, 1994). Por otra parte, el uso de cobre en la oxidación de los cianuros también ha sido reportado varios estudios (Wels y col., 1990; Hofseth y col., 1992; Hofseth y col., 1999.). En estos trabajos se muestra que en ánodos recubiertos con una pequeña película de cobre se lleva a cabo un mecanismo homogéneo de la reacción de oxidación del ion cianuro, indicando que la oxidación de  $\text{CN}^-$  se debe a un efecto catalítico que involucra la interconversión cíclica de  $\text{Cu(I)}$  a  $\text{Cu(II)}$ . Una de estas investigaciones muestra que la película de cobre no es estable en concentraciones moderadas de cianuro mayores a 1 mM (Hofseth y col., 1992), por lo cual el cobre del electrodo se lixivía, esto hace que el proceso catalítico de oxidación de cianuro se encuentre limitado a concentraciones de cianuros  $< 1\text{mM}$ .

Ente esta situación, los estudios de la oxidación electroquímica catalizada de cianuros por iones  $\text{Cu(I)}$  directamente sobre el electrodo representa una alternativa atractiva con respecto a los procesos químicos y a los procesos electroquímicos que utilizan electrodos modificados con cobre. El proceso es simple y no involucra peligro por que no se tienen la reacción explosiva ni tóxicas que se produce los procesos químicos. Además, la soluciones concentradas de cianuro (mayores a 100 ppm) pueden ser tratadas de forma más económica (Hofseth y col., 1999) por la oxidación electroquímica, al no tener bajas eficiencias de corriente como las que se tienen en una solución diluida.

En los trabajos previos (Reyes, 1998; Reyes y col., 2000; Reyes, 2002) que anteceden a esta investigación se estudio la oxidación catalítica de cianuros en presencia de iones cobre, en diferentes condiciones hidrodinámicas y con la modificando la superficie de los electrodos. En estos estudios se propuso que la destrucción de cianuros se realiza a través del mecanismo teórico heterogéneo [1]-[4] planteado por C.S.Hofseth y col. (1991).



Donde el asterisco \* representa los sitios activos, el subíndice ads significa especies adsorbidas, v los coeficientes estequiométricos de adsorción en la superficie del electrodo y P los posibles productos de la oxidación de  $\text{CN}^-$ .

En esta investigación se realiza el estudio voltamperométrico de la oxidación electroquímica de cianuros variando la relación  $\text{CN}^-/\text{Cu(I)}$  en tres diferentes sustratos: Carbón Vítreo (CV), Acero Inoxidable 304 y Ti. La finalidad de este estudio es el determinar el efecto del que tiene la relación  $\text{CN}^-/\text{Cu(I)}$  y sustrato sobre el mecanismo de reacción heterogéneo [1]-[4] de la oxidación EC Catalítica de  $\text{CN}^-$ , mediante el análisis de los resultados de los estudios previos y los de este trabajo. Lo anterior permitirá establecer un criterio para seleccionar el material más conveniente en destrucción de cianuros de la industria hidrometalúrgica.

## 2. MATERIALES Y METODOS

En este trabajo se utiliza una celda de vidrio Pyrex de 100 ml de capacidad, un sistema de 3 electrodos (trabajo, auxiliar y referencia) con entrada de nitrógeno. El electrodo auxiliar fue una barra de grafito, el electrodo de referencia que se utilizó fue un electrodo saturado de calomel (SCE) y los electrodos de trabajo sobre los que se estudia la oxidación de cianuros fueron: Carbón Vítreo (área geométrica de  $0.20 \text{ cm}^2$ ), Ac. Inoxidable 304 (área geométrica de  $0.03 \text{ cm}^2$ ) y Ti (área geométrica de  $0.12 \text{ cm}^2$ ). La superficies de los electrodos fueron pulidas a espejo con polvo de alúmina (tamaño de partícula  $0.3 \mu$ ); después de enjuagan con agua desionizada, y se someten a una vibración ultrasónica con el fin de remover las trazas de alúmina y grasas, para finalmente enjuagarse con agua desionizada.

La oxidación de cianuros se realizo en soluciones que contenida: 0.15M CuCN y 0.45M KCN; 0.12M CuCN y 0.48M KCN y finalmente 0.1M CuCN y 0.5M KCN (relaciones  $\text{CN}^-/\text{Cu(I)}$  de 4, 5 y 6, respectivamente). Las soluciones se prepararon con reactivos analíticos y con agua desionizada de  $18 \text{ m}\Omega$ . El pH se mantuvo constante en 10 y las soluciones fueron desoxigenadas con nitrógeno durante 10 min antes de realizar los experimentos, posteriormente el flujo de  $\text{N}_2$  se mantuvo sobre la solución. La

condición de concentración de la relación  $CN/Cu=6$  (que es la de principal interés de este estudio) asegura la presencia de  $Cu(CN)_4^{3-}$  (Reyes, 1998); esta relación es muy similar a con la considerada en un estudio de descomposición de cianuros con 1400 ppm en un reactor electroquímico empacado (Hofseth y col., 1999). Esta relación es importante por que bajo esta consideración, se asume que la concentración de cianuro libre para este trabajo es de 0.2 M evitando la formación de  $CuO$  en la superficie.

Durante los experimentos se utilizó un potenciostato de la marca EG&G, modelo PARC 273 cuya potencia es de 100 W. Las técnicas utilizadas en el PARC 273 se manejaron a través del software M270 de la misma compañía.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los estudios previos a este trabajo, determinaron el intervalo de potencial donde se lleva a cabo la oxidación catalítica de cianuros sobre los electrodos de VC, Acero Inoxidable 304 y Ti; así mismo, se determinó que las especies electroactivas adsorbidas de  $CN^-_{ads}$ ,  $Cu(I)_{ads}$  y  $Cu(II)_{ads}$  juegan un papel importante en la oxidación catalítica de cianuros.

En la figura 1 se observa que la oxidación de  $CN^-$  en ausencia de la especie electroactiva de  $Cu(I)$  se lleva a cabo en el intervalo de potencia de: 0.4V a 1.2V para el VC, 0.3V a 0.7V para el Acero Inoxidable 304 y 0.4V a 1.4V para en el Ti (figuras 1a, 1b y 1c, curvas ii, respectivamente).

La presencia de  $Cu(I)$  en la solución, muestra un incremento en la densidad de corriente en el intervalo de potencial donde se da la oxidación de  $CN^-$ , indicando que se está llevando a cabo el proceso EC Catalítico de oxidación de  $CN^-$ , debido a la interconversión cíclica de  $Cu(I)$ - $Cu(II)$  (figuras 1a, 1b y 1c, curvas iv). Por otra parte, en las curvas iv de los sustratos de VC y Acero Inoxidable 304 se observa un máximo de corriente en un potencial de  $E_{pox} = 0.72V$  y en  $E_{pox} = 0.55V$  respectivamente. La disminución de la corriente en los  $E_{pox}$  sobre VC y Acero Inoxidable 304, puede ser asociada a 1) a la pasivación del electrodo, 2) a la limitación de transferencia de masa de las especies electroactivas ó 3) a las especies electroactivas adsorbidas.

Es importante resaltar que el Ti no se tiene un máximo de densidad de corriente (figura 1 curva i) debido a que este material se pasiva después del primer barrido anódico de potencial. Este hecho nos permite descartar que la disminución de la densidad de corriente después  $E_{pox}$  sobre VC y Acero Inoxidable 304 sea debida a la pasivación de estas superficies.

En las curvas v de la figura 1 se observa que la presencia del tensoactivo en la solución cianurada de cobre hace energéticamente más favorable la oxidación de cianuros en VC (figura 1a); mientras que en el Acero Inoxidable 304 la oxidación de cianuros deja de ser catalítica, lo cual se observa al tener el mismo orden de magnitud de la densidad de corriente de la solución cianurada libre de iones  $Cu(I)$  (ver recuadro A de la figura 1b, curvas v y ii). Por otra parte, en el Ti sólo se observa un pequeño decremento en la densidad de corriente. La comparación de los voltamperogramas de la solución

cianurada con tensoactivo en presencia (figura 1 curvas v) y ausencia de Cu(I) (18) en los tres sustratos utilizados determinaron que en el VC la especie que se adsorbe preferencialmente es el  $CN^-_{ads}$ , mientras que en Acero Inoxidable 304 y Ti es el  $Cu(I)_{ads}$  ó  $Cu(II)_{ads}$ . De esta forma, se establece que las especies adsorbidas juegan un papel importante en la oxidación catalítica del cianuro. Sin embargo, la transferencia de masa puede también ser importante.

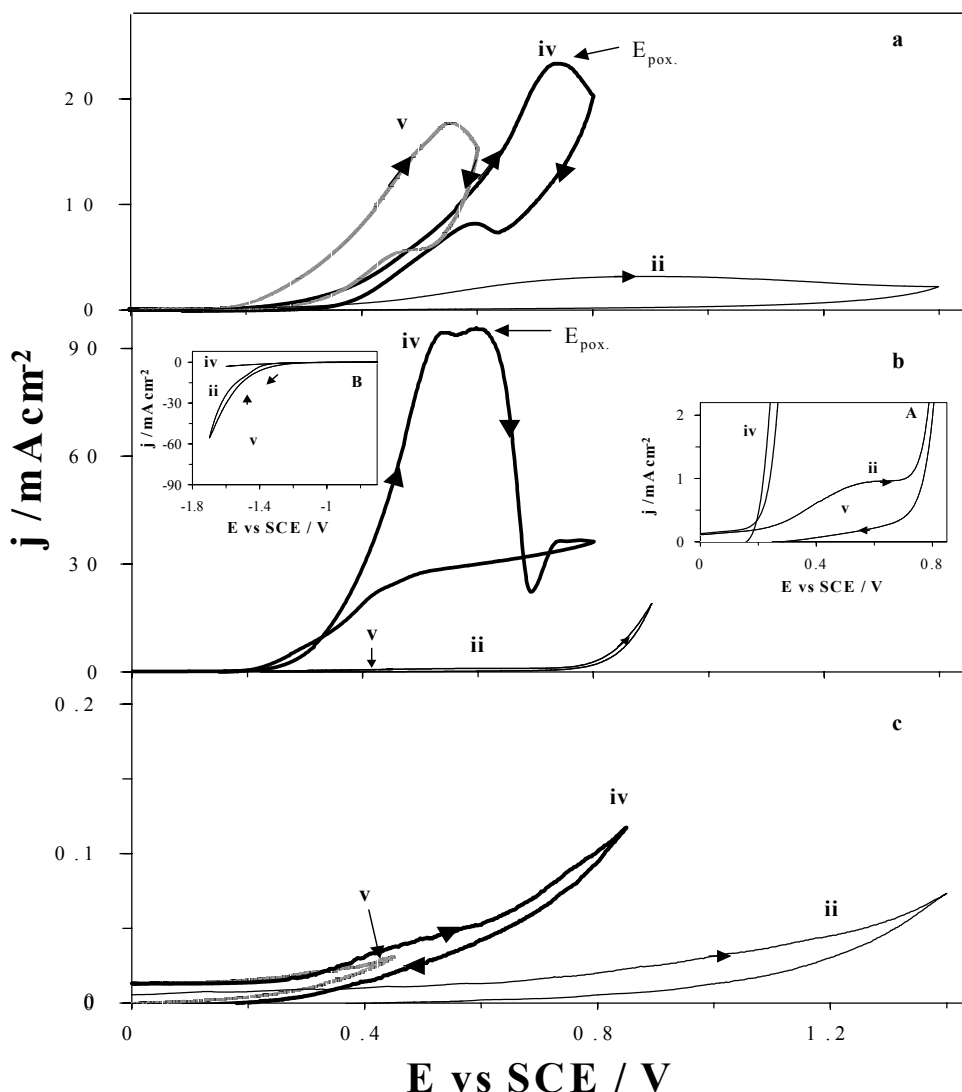


Figura 1 Comparación de los voltamperogramas cíclicos de una solución cianurada en ausencia de Cu(I) (curva ii), en presencia de Cu(I) (curva iv) y en presencia de Cu(I) con tensoactivo Tritón 100X (curva v) a 20mV/s y pH de 10, realizados sobre CV (a), Acero Inoxidable 304 (b) y Ti (c) respectivamente.

La figura 2 muestra el estudio voltamperométrico donde se invierte el barrido de potencial en dirección positiva  $E_{\lambda}$ , en una solución cianurada de cobre sin agitación (curvas i) y con agitación (curvas ii) sobre VC, Acero Inoxidable 304 y Ti.

En la figura 2 se observa que al comparar las respuestas  $j$  vs  $E^\lambda$ , en los electrodos de CV y Acero Inoxidable 304 que cuando  $E_\lambda$  es menor a  $E_{\text{pox}}$  la densidad de corriente de la oxidación de  $\text{CN}^-$  es mayor cuando se tiene la solución sin agitar (curvas i) con respecto a cuando se agita la solución (curvas ii). Por otra parte, cuando  $E_\lambda$  es mayor a  $E_{\text{pox}}$  la densidad de corriente es mayor al agitar la solución, teniendo siempre el proceso EC Catalítico de la oxidación del cianuro. Este estudio permite descartar el que la disminución de la densidad de corriente después del  $E_{\text{pox}}$  de los electrodos de VC y Acero Inoxidable 304 es debida a limitación de la transferencia de masa de las especies electroactivas. No obstante, la disminución de la densidad de corriente de la solución sin agitar podría estar asociada a la modificación de las especies electroactivas en la interface debido al cambio de la relación molar de  $\text{CN}^-/\text{Cu(I)}$  sobre la superficie del electrodo.

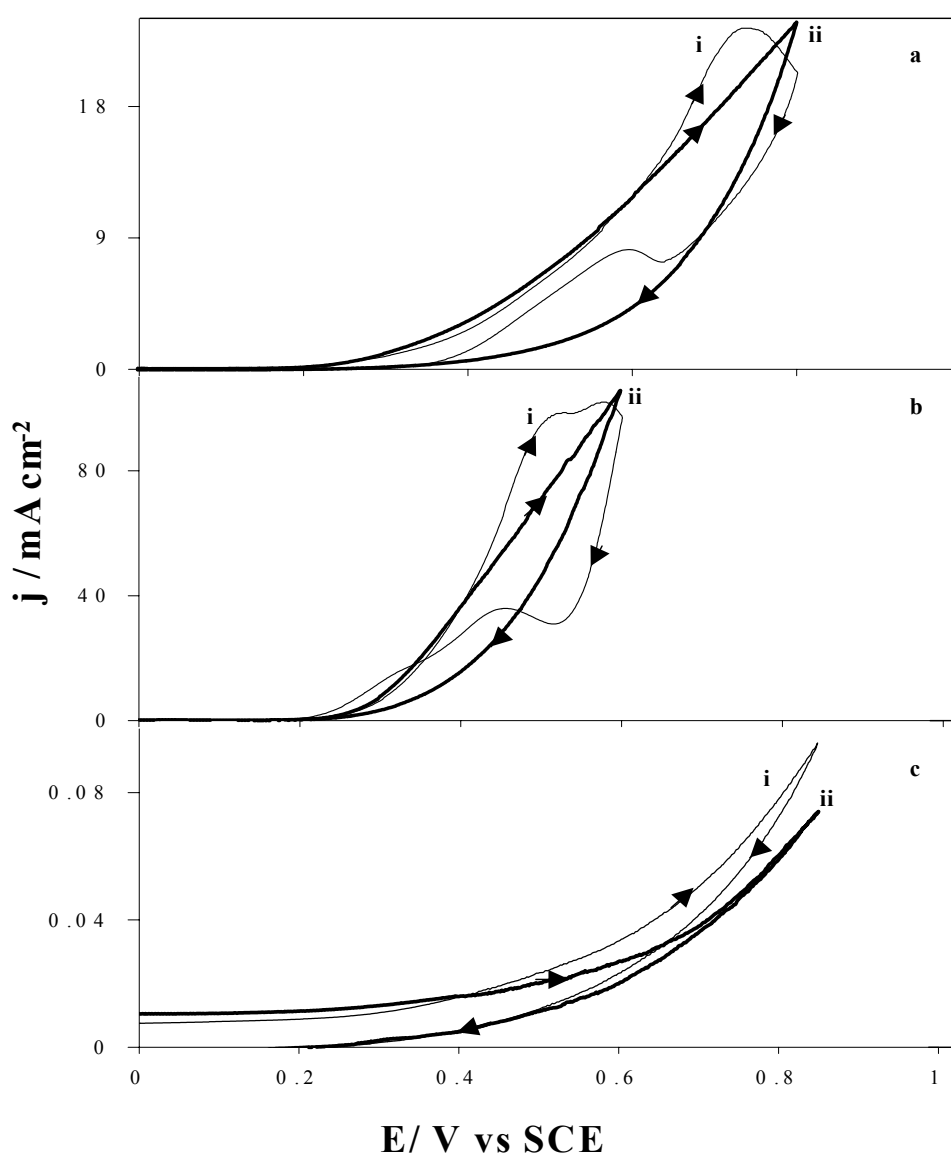
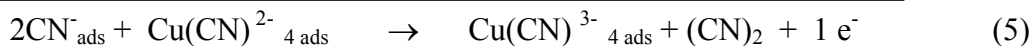
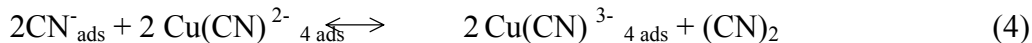
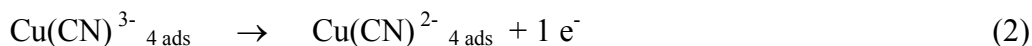


Figura 2 Comparación de los voltamperogramas cíclicos de una solución cianurada de  $\text{Cu(I)}$ , sin agitar la solución (curvas i) y agitando la solución (curva ii) a  $20\text{mV/s}$  y  $\text{pH}$  de 10, realizados sobre CV (a), Acero Inoxidable 304 (b) y Ti (c) respectivamente.

Con el fin de comprobar esta hipótesis en este trabajo se realizaron voltamperométrías lineales de la oxidación catalítica de cianuros, obtenidas con diferentes relaciones molares de  $\text{CN}^-/\text{Cu(I)}$  (donde la concentración total de cianuros fue siempre de 0.6 M) sobre los electrodos de VC, Acero Inoxidable 304 y Ti. Los resultados de estas voltamperométrías se muestran en la figura 3.

En la figura 3 se observa que en el electrodo de VC, el incremento de relación molar de  $\text{CN}^-/\text{Cu(I)}$  desplaza el potencial de oxidación del cianuro hacia valores más positivos; mientras que el valor de la densidad de corrientes disminuye respecto a un mismo potencial (figuras 3ar4, 3ar5 y 3ar6). Este resultado concuerda con un estudio de la oxidación anódica de cianuro de cobre sobre un electrodo de grafito (Lu y col., 2002). En contraste, sobre los electrodos de Acero Inoxidable y Ti (figuras 3b y 3c), el incremento de relación molar de  $\text{CN}^-/\text{Cu(I)}$  desplaza el potencial de oxidación de cianuros a valores menos positivos y la densidad de corriente decrece para un mismo potencial (figuras 3br4, 3br5, 3br6, 3cr4, 3cr5 y 3cr6).

El comportamiento electroquímico observado de estos resultados puede estar relacionado al predominio de una especie adsorbida en la superficie, la cual cambia de  $\text{CN}^-$  en el VC a  $\text{Cu(I)}$  y  $\text{Cu(II)}$  en Acero Inoxidable y Ti. La parte de global del mecanismo (Ecuaciones 1-4) que explica estos resultados, en las cuales las especies de tetracianurocuproso y tetracianurocuprico están predominando en la fase acuosa, es:



El potencial termodinámico para la oxidación de cianuros de la ecuación 5, se obtiene usando la ecuación 6 (Rojas, 1991):

$$E = -0.657 + 0.06 \log \{[(\text{CN})_2] [\text{Cu(CN)}_3^{3-}]_{\text{ads}}\} - 0.06 \log \{[\text{CN}^-]_{\text{ads}}^2 [\text{Cu(CN)}_4^{2-}]_{\text{ads}}\} \quad (6)$$

En el electrodo VC conforme se incrementa la relación molar de  $\text{CN}^-/\text{Cu(I)}$  disminuye el valor de producto  $[\text{CN}^-]_{\text{ads}}^2 [\text{Cu(CN)}_4^{2-}]_{\text{ads}}$  de la ecuación 6. Este efecto mueve el potencial de la oxidación catalizada de  $\text{CN}^-$  a valores más positivos. En contraste, para los electrodos de Acero Inoxidable 304 y Ti éste producto es mayor con el incremento en la relación molar de  $\text{CN}^-/\text{Cu(I)}$  y desplaza el potencial a valores menos positivos. Este comportamiento puede ser atribuido a que la adsorción preferencial del  $\text{CN}^-_{\text{ads}}$  sobre el VC evita la adsorción del  $\text{Cu(II)}$  lo cual provoca que la reacción 4, del mecanismo propuesto, se lleve a cabo hacia la izquierda. Una mayor cantidad de  $\text{Cu(I)}_{\text{ads}}$  favorece la producción de  $\text{Cu(CN)}_4^{2-}$  a través de reacción la 3. Además, la disminución del  $\text{Cu(II)}_{\text{ads}}$  se ve reflejada en la densidad de corriente de la figura 3a.

Por otra parte, en el Acero Inoxidable 304 y Ti, se adsorbe menos  $\text{CN}^-$  y más  $\text{Cu(CN)}_4^{2-}$  lo que da lugar a que la reacción 4 se lleve a cabo hacia la derecha; sin embargo, al tener menos cantidad de  $\text{CN}^-$ , se tienen menos productos de la oxidación de éste, lo cual se refleja también en la densidad de corriente de la figura 3b y 3c.

Los resultados de este trabajo establecen que las especies que controlan el proceso de oxidación catalítico de cianuros son diferentes para el VC y el Acero Inoxidable 304. En el Acero Inoxidable 304 se adsorben fácilmente las especies de  $\text{Cu(I)}_{\text{ads}}$  y  $\text{Cu(II)}_{\text{ads}}$  pero la especie adsorbida de  $\text{CN}^-_{\text{ads}}$  es la que controla la velocidad de la oxidación catalítica de cianuros. Mientras, que en el VC la especie que más se adsorbe en esta superficie es  $\text{CN}^-_{\text{ads}}$  y las especies adsorbidas  $\text{Cu(I)}_{\text{ads}}$  y  $\text{Cu(II)}_{\text{ads}}$  son las que controla la velocidad de la oxidación catalítica de cianuros.

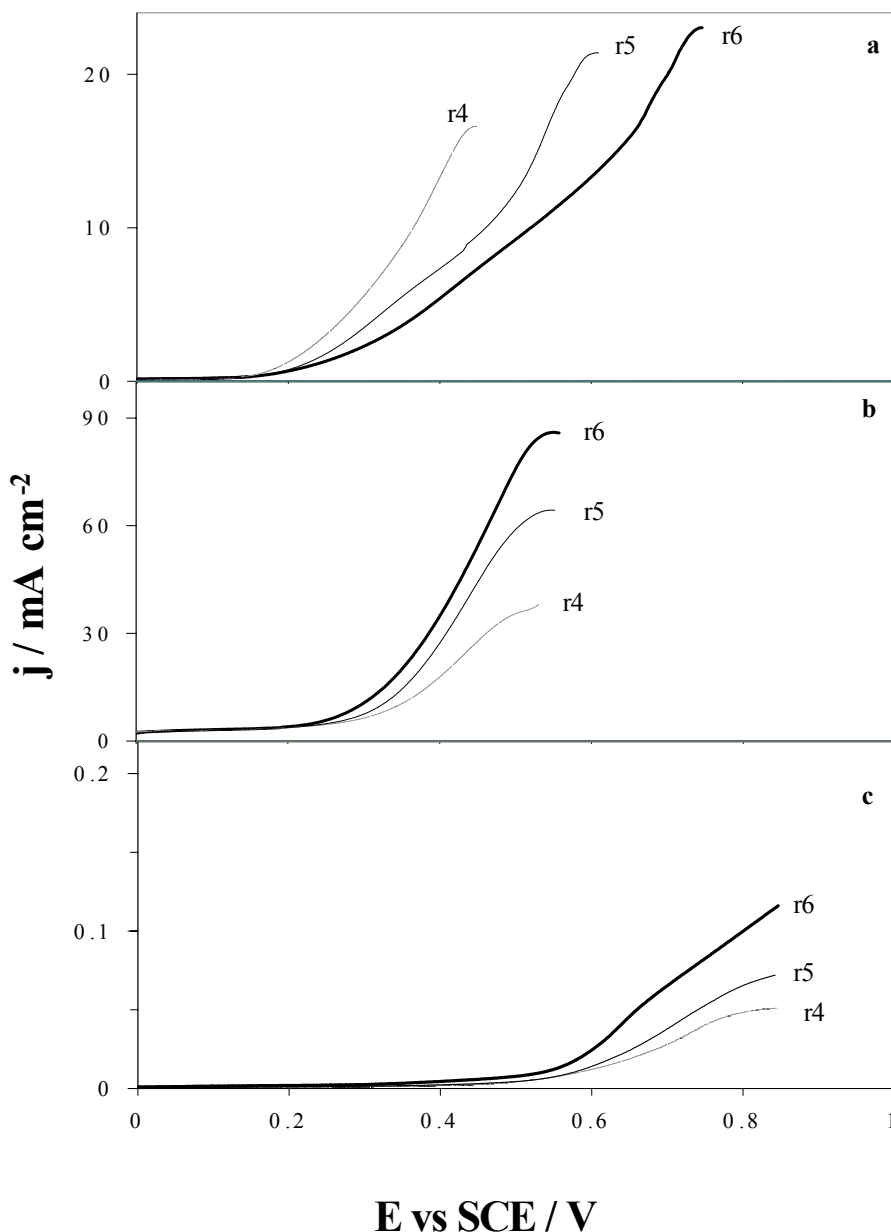


Figura 3 Comparación de los voltamperogramas de una solución que contiene diferentes relaciones molares de  $\text{CN}^- / \text{Cu(I)}$ : 0.15M de CuCN y 0.45M de KCN (r4), 0.12M de CuCN y 0.48M de KCN (r5) y finalmente 0.1M de CuCN y 0.5M de KCN (r6) sobre CV (a), Acero Inoxidable 304 (b) y Ti (c) a un pH de 10 y una velocidad de barrido de 20mV/s.



#### 4. CONCLUSIONES

El tipo de material del electrodo utilizado en el proceso EC Catalítico de oxidación de cianuro juega un papel muy importante, debido a que los procesos de adsorción que se llevan a cabo en su superficie influyen en el mecanismo de transformación de los cianuros. Por otra parte, relaciones molar de  $CN^-/Cu(I)$  modifica el potencial del proceso catalítico de oxidación de cianuros. Los resultados experimentales de este trabajo, pueden ser la base para proponer que la destrucción y anulación de la toxicidad del cianuro de soluciones provenientes de la industria hidrometalúrgica mediante la utilización de electrodos no modificados, aprovechando el efecto catalítico del  $Cu(II)_{ads}$  electrogenerado. Finalmente, estos resultados pueden servir para establecer que tipo de material es el más adecuado para realizar la destrucción de cianuros.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la UAEH y a la UAMI por los apoyos económico otorgado para realizar este trabajo. Así mismo, agradecen a los doctores del área de electroquímica del Centro de Investigación de Química de la UAEH por facilitar su infraestructura para llevar a cabo este trabajo.

#### 6. REFERENCIAS

- Dadgar A. and Howarth J. (1992), "Gold Leaching and Recovery: The Bromide Process", in R. Woods and P. E. Richardson (Eds.), *Electrochemistry in Mineral and Metal Processing III*, Electrochem. Soc. Pennington p478.
- Eckenfelder, Wesley W. (1989), *Industrial Water Pollution Control*, Second Edition, Ed. McGraw-Hill Book Company, p303.
- Han K.N. and Xinghui M (1992), US Patent 5114687.
- Hofseth C. S. and Chapman T. W. (1999), "Electrochemical destruction of Dilute Cyanide by Copper-Catalyzed Oxidation in a Flow-Through Porous Electrode", *J. Electrochem. Soc.*, **146**, 199.
- Hofseth C. S. and Chapman T. W. (1992), "Indirect Electrochemical Processes at a Rotating Disk Electrode: Catalytic Alkaline Cyanide Oxidation", *J. Electrochem. Soc.*, **139**, 2525.
- Hofseth C.S. and Chapman T. W. (1991), "Rotating Ring-Disk Electrode Studies of Cyanocuprous Ion Oxidation on Platinum", *J. Electrochem. Soc.*, **138**, 2321.
- Lamb F. E (1982), U. S. Patent 4342592,.
- López Escutia Ma Concepción, Tesis de Maestría en Ingeniería Química (2003), "Lixiviación de Plata a partir de Concentrados Sulfurados con Tiourea Electrooxidada" UAMI, México.
- Lu J., Dreisinger D. B. and C. W. (2002). Anodic oxidation of copper cyanide on graphite anodes in alkaline solution, *J. Appl. Electrochem.* **32**, 1119.
- Oropeza M.T., González I. and Palomar M (1991), Patente Mexicana 9101212,

- Oropeza M.T. (1991), Tesis Maestría en Química, “Alternativas a la Recuperación no Contaminante de plata: Disolución y Formación de Electrodeposición (Electrocristalización)”, UAM-I, México,
- Palomar M (1991), Tesis de licenciatura en Química, “Proceso no contaminante para recuperación de plata de sus minerales”, UAM-I, México.
- Park D. and Chang W. (1997), "Oxidation of Aqueous Cyanide Solution Using Hydrogen Peroxide in the Presence of Heterogeneous Catalyst", *Environmental Technology*, **18**, 557.
- Pyper R. and Hendrix J. L. (1981), “Extraction of gold from finely disseminated gold ores by acidic Thiourea solution” in *Extraction Metallurgy* **81** I. M. M. London, p157.
- Ramaldo R. S. (1983), *Introduction to Wastewater Treatment Processes*, Second Edition, Ed. Academic Press, p533.
- Reyes Cruz V.E. (2002), Tesis de Doctorado en Ciencias “Recuperación Selectiva de “DORÉ” (Au-Ag) de Disoluciones Provenientes de la Lixiviación de Minerales, Utilizando un Reactor Electroquímico FM01-LC”, UAMI, México.
- Reyes Cruz V.E., Oropeza M.T., Ponce de León C. y González I. (2000), Evaluación voltamperométrica de la influencia del sustrato en la oxidación catalizada de cianuros por iones cobre. XIV Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Electroquímica y XV Congreso Nacional de Electroquímica; Oaxaca, Oaxaca, México: 213
- Reyes Cruz V.E., Oropeza M.T., y González I. (1998), Oxidación de cianuros catalizada por la presencia de iones cobre en solución. XIII Congreso Nacional De la sociedad Mexicana de Electroquímica; Torreón Coahuila, México.
- Rojas A., Ramírez M. T., Ibáñez J. G. and González I. (1991), “Construction of Multicomponent Pourbaix Diagrams Using Generalized Species”, *J. Electrochem. Soc.* **138**, 366.
- Tissot P. and Fragniere M. (1994), “Anodic oxidation of cyanide on a reticulated three-dimensional electrode”, *J. Appl. Electrochem.*, **24**, 509.
- Wang Xinag Huai (1992), “Thermodynamic Equilibrium Calculation on Au/Ag-Lixiviant Systems Relevant to Gold Extraction form Complex Ores”, in R. Woods and P. E. Richardson (Eds.), *Electrochemistry in Mineral and Metal Processing III*, Electrochem. Soc. Pennington p452.
- Wels B. and Johnson D. C. (1990), “Electrocatalysis of Anodic Oxygen Transfer Reactions: Oxidation of Cyanide at Electrodeposited copper Oxide Electrodes in Alkaline Media”, *J. Electrochem. Soc.*, **137**, 2785.