

# VENCIENDO TU MIEDO A LA ELECTROFLOCULACIÓN

## Resumen

Se presentan las justificaciones por las cuales la electrofloculación, debe ser considerada seriamente al tener que tratar fluidos tanto para potabilización, tratamiento de efluentes y sanitización. Se explican los principios básicos de un reactor y los de un reactor mejorado.

**Palabras clave:** Venciendo tu miedo a la electrofloculación , electrocoagulación , potabilización , efluentes .

## *Ending Your Fear About The Electroflocculation*

### **ABSTRACT**

*We expose by which the electroflocculation, should be seriously considered when having to deal both, for the fluids purification, for the effluent treatment and for the sanitización. We explain the basic principles for an electroflocculation chamber and an improved chamber are presented.*

### **Introducción: Fisicoquímica y electroquímica más de lo mismo**

La fisicoquímica trata del equilibrio/desequilibrio energético de un sistema formado por diversas sustancias químicas.

El agua el, “disolvente universal”, disuelve un gran número de sustancias, esto significa que toma iones con ella. Desde principios del siglo XX sabemos que, con una diferencia de potencial suficiente, podemos inyectar portadores de carga (iones) en medios líquidos. Que macroscópicamente, estadísticamente, y con no pocas limitaciones, las leyes de Faraday, Arrhenius, Van Der Waals y Debye-Hückel se cumplen. En general los profesionales ven prejuiciosamente la utilización de la electroquímica como otra cosa diferente a la fisicoquímica que usan habitualmente.

Al tratar el agua, ya sea de cauces naturales o de efluentes generados por el hombre, una vez realizado el desbaste, y luego de unas horas de clarificación nos encontraremos con...

- 1.Soluciones verdaderas.
- 2.Coloides sólidos no sedimentables.
- 3.Población biótica, microorganismos y algas.
- 4.Emulsiones debido al uso generalizado de tensioactivos (surfactantes).
- 5.Sólidos sedimentables en suspensión mecánica.

Para 1 destilación, osmosis inversa, resinas y/o nanofiltración. Para 2 utilizamos, conjunta o separadamente, digestores biológicos anaerobios ,floculadores biológicos aeróbicos, floculantes químicos , coagulantes, y toda la parafernalia que sea necesaria con el fin de producir la desestabilización que nos permita la aparición de fases diferenciadas fácilmente separables. Para 3 utilizaremos biocidas como hipoclorito, dióxido de cloro, ozono etc.. Para el resto de 4 utilizaremos inyección de micro burbujas y métodos mecánicos, si es necesario. Para 5 sedimentación y/o filtrado. Si debemos transportar, para mantenimiento en la red, hipoclorito o dióxido de cloro.

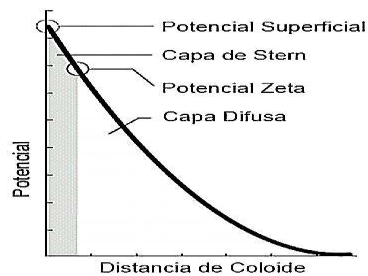
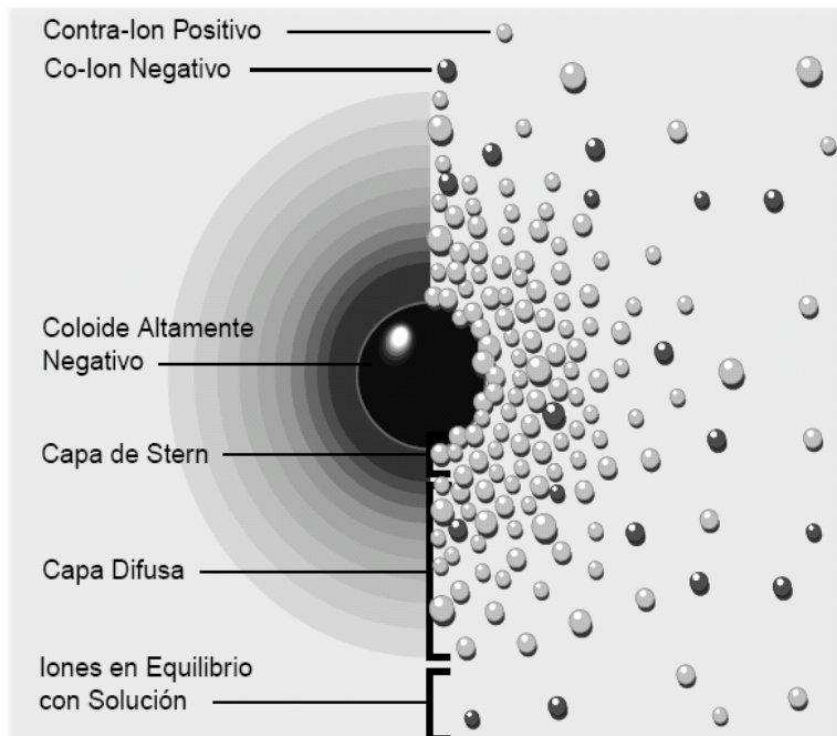
---

**KeyWords:** Ending your fear about the electroflocculation , electrocoagulation , potabilization , waste water .

## El potencial Z y la adsorción

La mayoría de los materiales dispersos en agua presentan un campo eléctrico que determina algún potencial para cada distancia, a ese potencial lo llamamos Z, los coloides, partículas, microorganismos, y pirógenos (fragmentos de bacterias), están cargados negativamente. De forma que alrededor de ellos tendremos un campo eléctrico de núcleo negativo y simplificado un campo eléctrico descendente según la ley de Coulomb en función  $1/r$  y la fuerza según  $1/r^2$  donde  $r$  es la distancia al centro del contaminante.

Estos contaminantes se encuentran en equilibrio dinámico debido a la repulsión electrostática entre ellos, y a la atracción que generan las fuerzas de Van der Waals con un potencial en función de  $1/r^6$  y fuerza según  $1/r^7$  con lo cual vemos que es muy inferior, para distancias grandes, a la electrostática.



Se entiende por adsorción la atracción electrostática que existe entre la partícula principal del coloide y los iones de la solución interna, esto depende del potencial de los iones en cuestión.

De esta forma, se deduce que la magnitud del potencial Z depende de la cantidad de iones adsorbidos en la capa fija. Es evidente que para que aumente el valor del potencial Z, los iones de signo contrario adsorbidos en esta capa deberán decrecer, la doble capa difusa aumentará su espesor según se vio y se incrementarán de esta forma las fuerzas de repulsión entre dos coloides cargados con el mismo signo. Esto constituye un estado de mínima asociación de partículas por lo que la suspensión presenta un alto grado de estabilidad; este estado de la solución coloidal se denomina **disperso**.

Por el contrario, cuando a consecuencia de un aumento de la concentración de electrolitos en el medio, la cantidad de iones adsorbidos en la capa fija aumenta, el potencial Z disminuye y la doble capa difusa se contrae. Bajo esta situación, los coloides logran acercarse unos a otros lo suficiente como para que las fuerzas de corta distancia de Van Der Waals las mantenga unidas. En este caso, se dice que la estabilidad de la suspensión ha disminuido con respecto a la total dispersión y al estado se le denomina **floculado**.

Para alcanzar el estado **floculado** el potencial Z no debe necesariamente descender hasta un valor de cero, sino hasta un cierto valor llamado "valor crítico" o "potencial crítico" específico de cada suspensión coloidal.

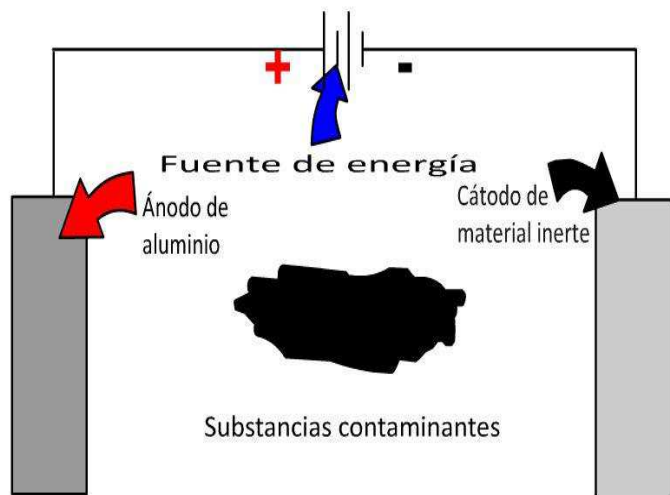
Como acabamos de ver en el modelo de doble capa o potencial Z, los coloides de un agua son partículas con una estructura compleja dotadas de una carga eléctrica neta negativa distribuida por su superficie.

Cuando una sal como el sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3$  se encuentra en un disolvente, se separa en sus iones componentes, y vemos como los aniones de aluminio  $Al^{3+}$  se unen a los coloides (catiónicos como hemos visto) y reducen el potencial Z generando coágulos y floculos.

¿Pero que ocurre con los iones sulfato?.

Se convierten en parte de los subproductos indeseables a tratar para su destino final. Fatalmente, en alguna medida, cuando disolvemos coagulantes químicos, siempre tendremos subproductos no deseados.

### Una visión gráfica (y sesgada) de la electrofloculación (EC)



El kit básico de un reactor de EC consiste en :

- Una fuente de baja tensión y relativa alta corriente.
- Un electrodo de material de sacrificio como Al, Fe, Cu, Ag para el ánodo (+).
- Un electrodo de material inerte para el cátodo (-).
- Líquido con sustancias contaminantes. (muy importante)...

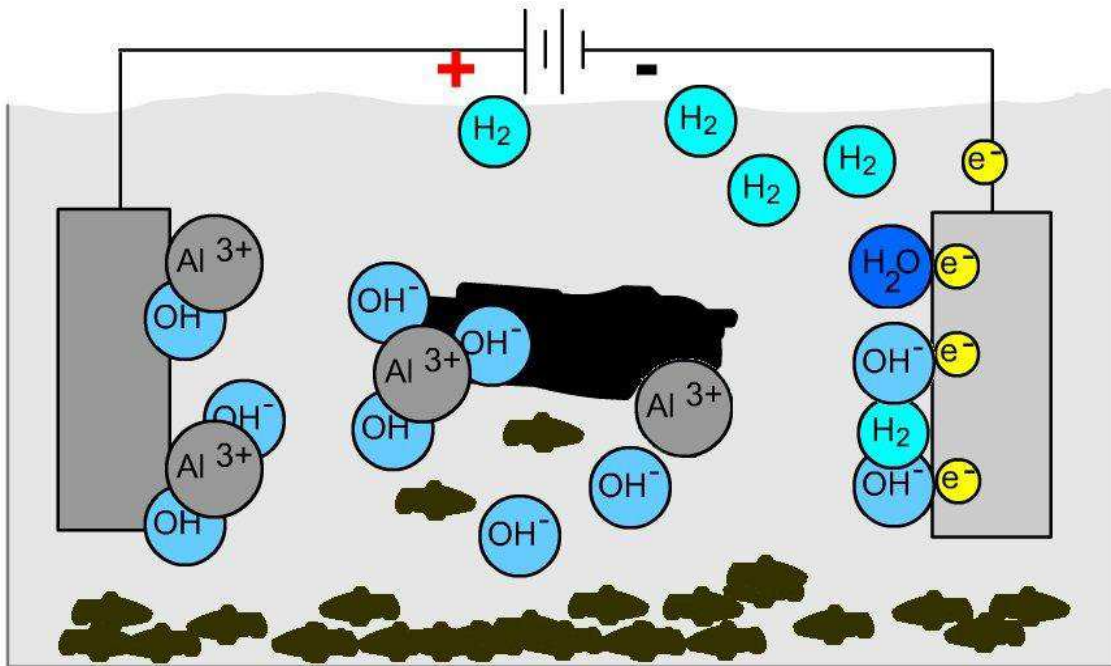
Solo a modo de ejemplo podríamos pensar en:

Fuente de 12V dc, corriente máxima de 12A y amperímetro.

Electrodo de Aluminio de 200mm x 50mm x 2mm para el ánodo.

Electrodo de cualquier material, aluminio ,hierro, acero inoxidable etc. para el cátodo de iguales medidas que las del ánodo de aluminio.

1,5 litros de líquido a tratar.

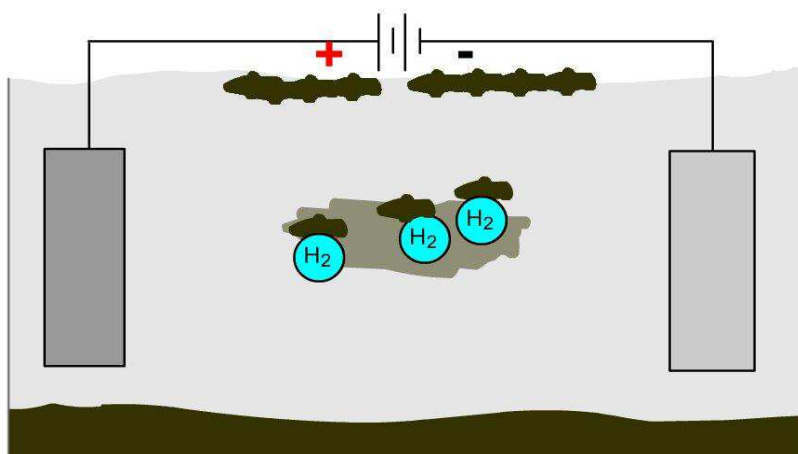


### Flóculos

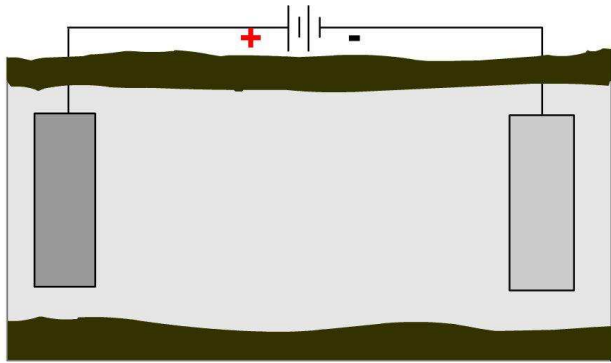
En la figura superior representamos algunas de las reacciones que se producen en nuestro reactor de EC..

Por un lado en el ánodo, borne negativo, cada dos electrones que descomponen el agua ( $H_2O$ ) obtenemos hidrógeno gaseoso ( $H_2$ ) y 2 radicales oxhidrilos ( $OH^-$ ).

Por el otro en el cátodo ,borne positivo, se emiten iones de aluminio ( $Al^{3+}$ ) que actuarán con los coloides y con los oxhidrilos formando flóculos pesados que después de un tiempo precipitan formando un lodo en el fondo del reactor.



Aquí representamos como el hidrógeno gaseoso ayuda a la flotación de los flóculos que por sus características no decantarían rápidamente, los mismos se reúnen formando una capa espumosa superior que reduce notablemente la emisión de olores.



Así nos quedan tres áreas diferenciadas una superior de espumas, una inferior de lodos y la central con el líquido tratado.

Lógicamente en distinta medida se produce la electrólisis del agua generando oxígeno naciente , e hidrógeno gaseoso .

### En síntesis

Cuando los metales son sometidos a un potencial anódico suficiente, el campo eléctrico, permite la migración de los iones del metal al seno del líquido. Esos aniones atraen electrostáticamente a los coloides (adsorben) e inducen la floculación.

Tenemos el mismo efecto pero sin la presencia de la parte catiónica , en nuestro ejemplo sin  $(SO_4)_3$

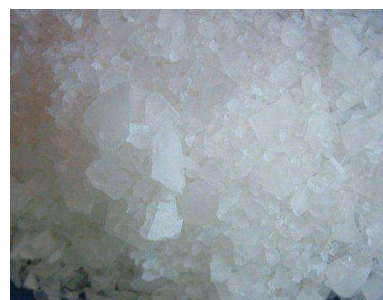
Al reemplazar con electrodos de aluminio al sulfato de aluminio, siendo los  $Al^{3+}$  responsables de la adsorción, entregamos solamente  $Al^{3+}$  , generando mucho menos lodo que en el caso del sulfato de aluminio.

El sulfato de aluminio está formado por dos átomos de aluminio  $Al_2$  y tres iones sulfato  $(SO_4)_3$ , o sea que cada vez que insertamos los 2 iones  $Al^{3+}$  provenientes del sulfato, fatalmente ingresamos tres iones sulfato. El mol de 2  $Al^{3+}$  es de 54g y el mol de  $Al_2(SO_4)_3$  es de 342g y contiene la misma cantidad del coagulante  $Al^{3+}$ .

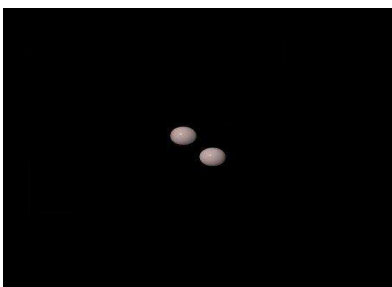
1Kg de electrodos de aluminio



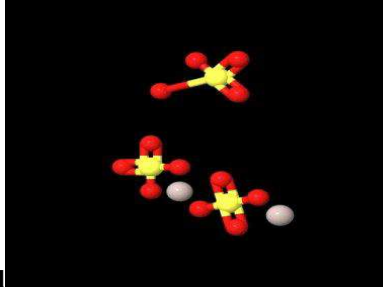
6,33 Kg de Sulfato de aluminio



1 Kg == 6,33 Kg



Átomos de Al



Sulfato de Al

Con electrodos de Al y Fe inyectamos los iones de Al y Fe que equivalen a la utilización de coagulantes con esos metales sin sulfatos y sin cloruros, con una notable reducción en la cantidad de lodos generados debido a la reducción de los subproductos y un menor estado energético de los mismos, o sea sus lixiviados serán más neutros.

La electrofloculación, no es, solo un proceso de electrólisis que se realiza al agua, ya que esto solo generaría oxígeno, hidrógeno y lodos de los electrodos. Si no que, lo que se realiza es un conjunto de procesos que incluyen a las sustancias originalmente contenidas en el agua y a iones selectivamente inyectados por los electrodos que por sus características interactúan modificando el estado de equilibrio de las sustancias originales, adsorbiéndolas, generando coágulos y floculos, pero además, interactuando con ellas a través de los radicales hidroxilo, el hidrógeno y el oxígeno naciente generado que es como aplicar difusores de oxígeno puro, eso también estamos haciendo lo que lógicamente es mucho más oxidante que la aireación atmosférica que solo aporta un 18% de oxígeno.

¡¡Y todo esto con muchos menos subproductos de la reacción!!

Se realizan simultáneamente estas operaciones..

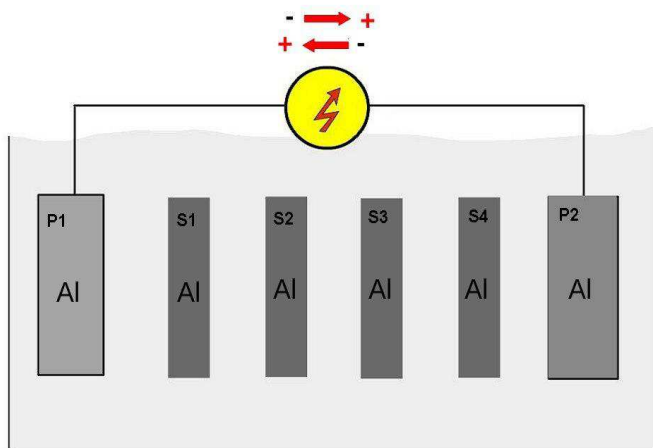
- 1.Los iones metálicos y sus hidróxidos inducen la floculación.
- 2.Por un lado el micro burbujeo tanto de H<sub>2</sub> como O<sub>2</sub> produce la ruptura de las emulsiones con notable facilidad.
- 3.Por otro el oxígeno naciente de los electrodos agrega una etapa de alta oxidación.
- 4.La presencia de los hidroxilos ayuda a reducir la carga orgánica

### Mejoras a la EC básica

Primero debemos evitar que por deposición electroquímica se produzca la pasivación (aislación) de los electrodos, principalmente el cátodo, para ello, lo que hacemos, es usar **el mismo material para el cátodo y el ánodo**, o sea que si para una determinada aplicación debemos utilizar ánodos de Fe, el cátodo también lo hacemos con el mismo material. Ejs: Cu-Cu, Al-Al, Ag-Ag.

Cambiamos la polaridad de la fuente periódicamente cada una cierta cantidad de minutos o segundos, de forma que los cátodos actúan como ánodos y viceversa.

Para usar fuentes más económicas aumentamos la tensión, e intercalamos más electrodos entre los dos principales sin ninguna conexión eléctrica externa entre ellos, a los electrodos principales los alejamos entre sí.



La configuración del reactor de EC quedaría así.

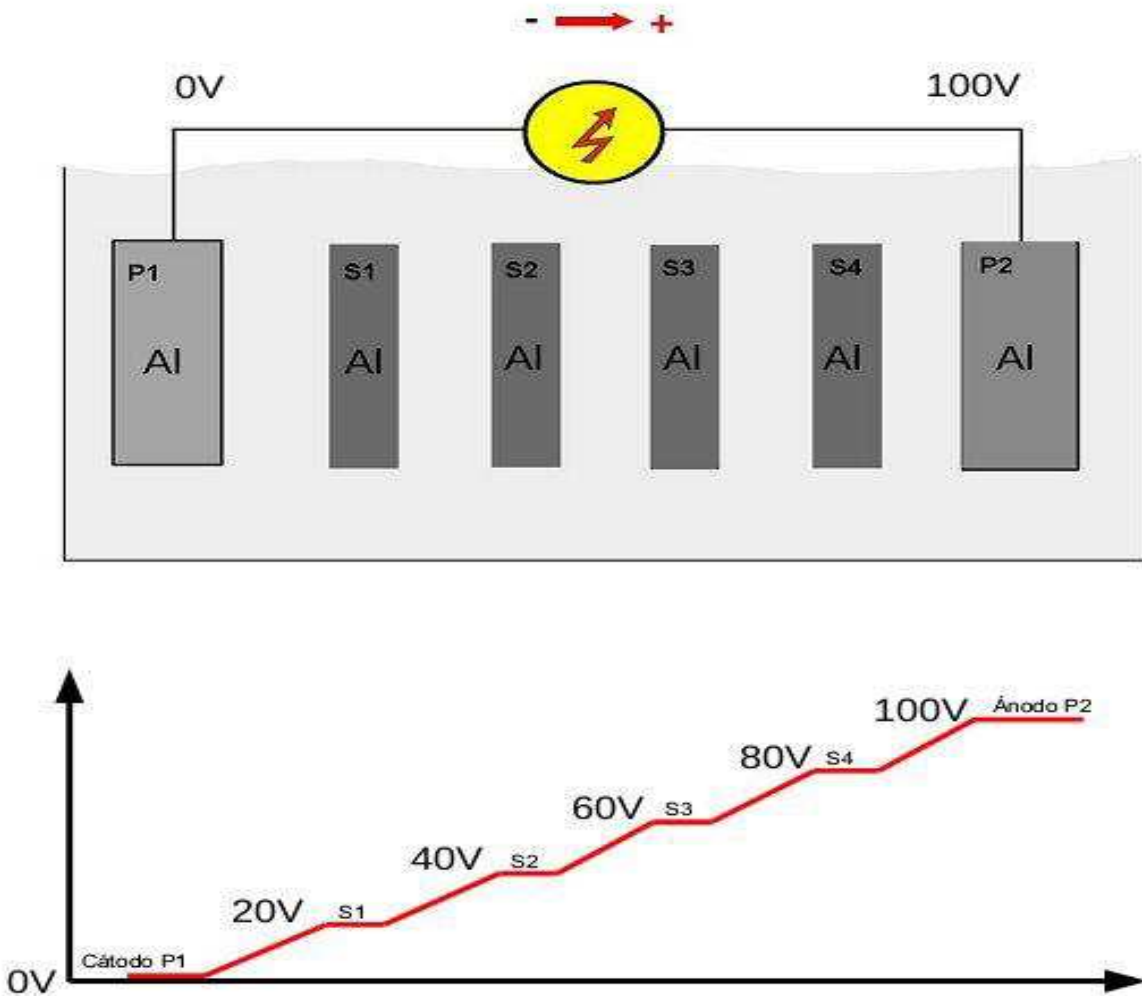
Lo que ocurre en el seno del líquido es que la tensión entre los dos electrodos principales **P1** y **P2** produce un campo eléctrico estacionario y una corriente que al circular por el líquido y los electrodos determina una caída de potencial entre los distintos electrodos secundarios **S1**, **S2**, **S3**, **S4**.

Mientras los electrodos principales tienen un potencial único debido a que la tensión está impuesta por la fuente y actúan como cátodo o ánodo en su totalidad según la polaridad temporal,

los electrodos secundarios se encuentran transportando cargas de izquierda a derecha o de derecha a izquierda con lo cual una de sus caras será cátodo, mientras la opuesta se comportará como ánodo entregando los iones del metal del que esté constituido.

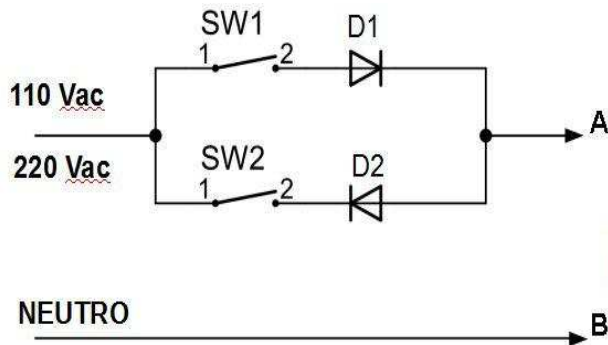
Imaginemos que **P1** está a potencial negativo respecto a **P2**, entonces **P2** es el ánodo principal, y **P1** el cátodo principal, las caras derechas de **S1**, **S2**, **S3** y **S4** son cátodos respecto al electrodo adyacente a la derecha y la cara izquierda ánodos respecto a los electrodos adyacentes a la izquierda, eso es debido a que el potencial de **P2** es mayor que el de **S4** y que el de **S4** es mayor que el de **S3** y el de **S3** mayor que el de **S2** y **S2** mayor que el de **S1** y finalmente **S1** que es mayor que el de **P1** que es el más negativo impuesto por nuestra fuente..

Imaginemos que la tensión aplicada fuera se 100 V. Si el líquido tiene características isotropas y medimos la diferencia de potencial entre electrodos , mediremos 20V entre **P1** y **S1**, 20V entre **S1** y **S2**, 20V entre **S2** y **S3**, 20V entre **S3** y **S4**, y finalmente 20V entre **S4** y **P2**. Lógicamente la caída total son los 100 V aplicados.



Las tensiones habituales entre los electrodos principales **P1** y **P2** , suele estar entre 50 V a 300V de dc en función de las características del líquido a tratar. Las corrientes y los tiempos de residencia deben ser tales que el proceso electroquímico siempre sea muy superior al efecto Joule. La temperatura máxima no debe superar los 55°C para obtener buenos rendimientos.

Como fuente basta con utilizar un circuito tan sencillo como el siguiente



Cuando SW1 está cerrado se aplica una tensión rectificadada positiva respecto al neutro con lo cual el electrodo A será ánodo principal y B será el cátodo principal.

Cuando SW2 está cerrado se aplica una tensión rectificadada negativa respecto al neutro con lo cual el electrodo A será cátodo principal y B será el ánodo principal.

### Conclusión

Electrocoagulación			
Impureza	Concentration en agua ANTES	DESPUES de Electrocoagulation	% Removido
Aldrin (pesticida)	0,063 mg/l	0,001 mg/l	98,40%
Aluminio	224,00 mg/l	0,69 mg/l	99,69%
Americo-241	71,99 pCi/L	0,57 pCi/L	99,20%
Arsénico	0,30 mg/l	< 0,01 mg/l	96,70%
Bacterias	110.000.000 cfu	2700 cfu	99,99%
Bario	0,0145 mg/l	< 0,0010 mg/l	93,10%
Boro	4,86 mg/l	1,41 mg/l	70,98%
Cadmio	0,1252 mg/l	< 0,0040 mg/l	96,81%
Calcio	1321,00 mg/l	21,40 mg/l	98,40%
Chlorieviphos (pesticida)	5,87 mg/l	0,03 mg/l	99,50%
Cromo	139,00 mg/l	< 0,10	99,92%
Cobalto	0,1238 mg/l	0,0214 mg/l	82,71%
Cobre	0,7984 mg/l	< 0,0020	99,75%
Cypermethrin (pesticida)	1,30 mg/l	0,07 mg/l	94,60%
DDT (pesticida)	0,261 mg/l	0,002 mg/l	99,20%
Diazinon (pesticida)	34,00 mg/l	0,21 mg/l	99,40%
E coli Bacteria	> 2419,2 mpn	0,0 mpn	99,99%
Hierro	68,34 mg/l	0,1939 mg/l	99,72%
Plomo	0,3497 mg/l	< 0,0250 mg/l	92,85%
Lindane (pesticida)	0,143 mg/l	0,001 mg/l	99,30%
Magnesio	13,15 mg/l	0,0444 mg/l	99,66%
Manganeso	1,061 mg/l	0,0184 mg/l	98,27%
Mercurio	0,01 mg/l	< 0,002	66,60%
Molibdeno	0,18 mg/l	0,04 mg/l	80,60%
Niquel	183 mg/l	0,07 mg/l	99,96%
Nitrato	11,7 mg/l	2,6 mg/l	77,78%
Nitrito	21 mg/l	12 mg/l	42,86%
Nitrógeno TKN	1118,88 mg/l	59,08 mg/l	94,72%
Hidrocarburos de Petroleo	72,5 mg/l	< 0,2 mg/l	99,72%
Fosfatos	28 mg/l	0,2 mg/l	99,28%
Plutonio-239	29,85 pCi/L	0,29 pCi/L	99,00%
Potasio	200 mg/l	110 mg/l	45,00%
Proptamphos (pesticida)	80,87 mg/l	0,36 mg/l	99,60%
Radio	1093,0 pCi/L	0,1 pCi/L	99,99%
Señeno	68 mg/L	38 mg/l	44,00%
Silicio	21,07 mg/l	0,10 mg/l	99,50%
Sodio	8690 mg/l	5770 mg/l	33,60%
Sulfato	104 mg/l	68 mg/l	34,61%
Estaño	0,213 mg/l	< 0,0200 mg/l	90,61%
Coliformes Totales Bacteria	> 2419,2 mpn	0,0 mpn	99,99%
Uranio	10,8 µg/l	0,1 µg/l	99,07%
Vanadio	0,2621 mg/l	< 0,0020 mg/l	99,24%
Zinc	221,00 mg/l	0,14 mg/l	99,90%

La aplicación de esta tecnología ha permitido el tratamiento eficaz y reutilización de efluentes, la potabilización de líquidos cloacales y el tratamiento preventivo por ionización con plata-cobre de aguas para bebida y natatorios.

El abastado de sustancias químicas es radicalmente inferior, ya que los lingotes, barras o chapas de los electrodos, son muchísimo más compactos que cualquier sustancia química a la que remplazan. Es fácilmente automatizable. Los reactores se pueden agrupar para tratar cualquier volumen deseado y cualquier secuencia necesaria. Por ej. una primera etapa con Fe otra con Al y una final con Ag.

A la izquierda podemos ver una tabla con distintas impurezas insertadas en agua potable blanda, a los efectos de mostrar los valores aislados de remoción.

Dejamos a Uds., la tarea de realizar las experiencias con sus casos reales y solucionar con bajo coste y con gran eficacia los problemas que comunidades, industrias, comercios y personas tienen en su provisión y tratamiento de aguas.

A veces como solución única, y otras como parte de la solución, este método electroquímico los llenará de satisfacciones, sin atentar con la sustentabilidad de nuestro medio ambiente.

Esperamos que los miedos para la aplicación de esta técnica, hayan sido disipados, y deseamos fervientemente que la incluyan cuando sopesen los casos que se les presenten.

Ante cualquier duda debemos acostumbrarnos a compartir nuestras experiencias, pues hay un mundo que reparar, que incluye a nuestro planeta nativo La Tierra el cual merece ser preservado.