

# DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA DESINFECCIÓN DE AGUA DE CONSUMO MEDIANTE TRATAMIENTO ELECTROQUÍMICO

Ángel Guillemes Peira

Universidad del Pacífico, Facultad del Mar y Medio Ambiente, Ecuador.

angel.guillemes@upacifico.edu.ec

---

**Resumen:** La existencia de normativas cada vez más restrictivas en relación al uso y la gestión del agua, han hecho que los procesos electroquímicos hayan adquirido cada vez más importancia como una alternativa en la desinfección del agua, permitiendo mejorar significativamente la calidad de la misma. El objetivo consistió en diseñar y desarrollar un sistema que permitiera demostrar su eficacia, al utilizar la tecnología electroquímica en tratamientos de desinfección y potabilización de agua para consumo. El sistema se diseñó para un caudal medio de 30 m<sup>3</sup>/h y se consiguió generar cloro libre a partir de los cloruros presentes en el agua, permaneciendo de forma residual y complementando la desinfección realizada por los reactores al quedar como oxidante en el agua, todo ello sin necesidad de tener que adicionar ninguna sustancia química en el tratamiento. Tanto el diseño del sistema como la tecnología electroquímica han resultado ser eficaces para la desinfección de agua potable, sin embargo, estos dependerán en gran medida de los límites de cloro libre que se pretendan mantener durante el tratamiento.

---

**Palabras claves:** cloro, desinfección, electroquímica, reactor, tratamiento.

## DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR DISINFECTING WATER BY ELECTROCHEMICAL TREATMENT

---

**Abstract:** Restrictive regulations regarding the use and management of water, have made the electrochemical processes have become more important as an alternative water disinfection, allowing significantly improve the quality of it. The objective was to design and develop a system that could demonstrate its own effectiveness, by using electrochemical disinfection treatment technology in purification of water for consumption. The system was designed for an average flow of 30 m<sup>3</sup> /h and it has been successful in generating free chlorine from the chloride present in water, remaining as residual and complementing the disinfection by the reactor to remain as oxidant in water, all it without having to add any chemicals during water disinfection. The design of the processing system and the electrochemistry technology, have proven effective for disinfection of water. However, they depend on the limits of free chlorine to apply.

---

**Keywords:** chlorine, disinfection, electrochemical, reactor, treatment.

## I. INTRODUCCIÓN

La promulgación de leyes cada vez más estrictas concernientes a los límites de vertido de distintas sustancias en las aguas residuales, así como la mejora en los estándares de calidad del agua potable, han hecho que los procesos electroquímicos ganen cada vez más importancia en las últimas dos décadas, e incluso actualmente hay compañías que suministran sistemas electroquímicos para tratamiento de potabilización y desinfección de agua.

Los procesos electroquímicos han alcanzado un estado en el cual no son solamente comparables desde el punto de vista económico con otros procesos, sino que también son más eficientes, compactos y automatizados. Los procesos electroquímicos utilizados en el tratamiento de aguas, emplean electricidad para producir una reacción química destinada a la eliminación o destrucción del contaminante presente en el agua. Un sistema electroquímico está formado básicamente por un ánodo donde tiene lugar la oxidación, un cátodo donde tiene lugar la reducción, y una fuente de potencia encargada de suministrar la electricidad [1].

El mercado está plagado de productos químicos y no todos funcionan igual, estos generan en el agua subproductos que hasta ahora no se están controlando mucho, pero que se está viendo que son cancerígenos. Una desventaja es que pueden llegar a generar resistencia, hay bacterias que tienen mecanismos de resistir hacia un oxidante. Hay que destacar que estos químicos a lo largo del tiempo pierden efectividad, es decir, poseen un tiempo de almacenamiento limitado, con lo cual no pueden ser almacenados en grandes volúmenes, lo cual implica bastantes gastos en cuanto a la logística se refiere. El problema que presentan no es el gasto en sí, sino la logística que genera.

El cloro es un biocida cuyo uso está ampliamente difundido en el ámbito de la potabilización de agua, sin embargo internacionalmente no está sujeto a las mismas limitaciones. Mientras que en países como Alemania, su uso está completamente prohibido, en España existen diferentes normativas reguladoras a lo largo del territorio. Normalmente, las limitaciones de la cloración en estaciones de tratamiento de agua potable, se centran en el control del no exceso de cloro por la peligrosidad que esto supone tanto para el consumidor como para las instalaciones.

El objetivo consistió en diseñar y desarrollar un sistema que permitiera demostrar su eficacia, al utilizar la tecnología electroquímica para tratamientos de desinfección y potabilización de agua para consumo.

La principal novedad alcanzada con el desarrollo de esta investigación, ha consistido en la ausencia de tener que adicionar ningún tipo de sustancia química en la desinfección del agua de consumo, habiendo conseguido generar cloro a partir de los cloruros presentes en el agua, permaneciendo de forma residual el cloro libre y complementando la desinfección realizada por los reactores al quedar como oxidante en el agua. Esto presenta beneficios tanto a nivel económico ya que se reducen los costes, como a nivel medioambiental por obtenerse un agua de mayor calidad.

## II. DESARROLLO

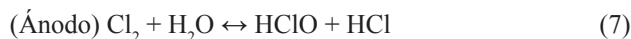
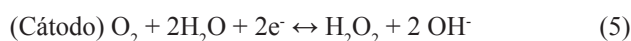
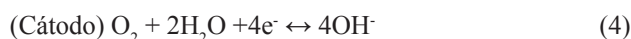
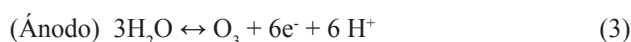
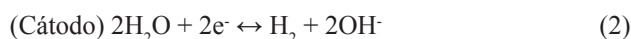
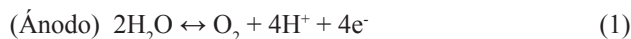
La desinfección electroquímica aplicada trabajó sin adición de compuestos químicos en el agua a tratar, pero basándose en parte en la acción biocida de diferentes sustancias químicas, que en este caso fueron producidas electroquímicamente. De esta manera la desinfección electroquímica de agua, puede definirse como la eliminación de patógenos y determinadas sustancias por aplicación de una corriente eléctrica en el agua, mediante el empleo de los electrodos adecuados.

La desinfección se consigue al provocar una alteración en los mecanismos celulares de los organismos, daños en la pared celular, alteración de la permeabilidad de la célula, alteración de la naturaleza coloidal del protoplasma o inhibición de la actividad enzimática, o por su separación física del medio en el que se encuentran. Puede lograrse mediante la aplicación de calor, luz, productos químicos oxidantes, ácidos e iones metálicos [2].

Los métodos de desinfección química empleados tradicionalmente utilizan alguno de los siguientes desinfectantes: cloro libre, dióxido de cloro, hipoclorito sódico o cloraminas. El ozono es una tecnología menos utilizada en la desinfección química. La eficiencia de cualquiera de estos productos desinfectantes es función de su concentración y del tiempo de contacto con la muestra que se quiere desinfectar, de manera que la eficiencia desinfectante aumenta cuando lo hacen los valores de las dos variables citadas.

## 1. Generación de especies químicas de acción biocida.

En el límite de fase entre los electrodos y el agua, la corriente eléctrica conduce a la producción electroquímica de diferentes especies desinfectantes a partir del agua ( $O_2$ ,  $O_3$ ,  $OH^-$ ) (reacciones 1, 2, 3 y 4), o de algunas especies disueltas en el agua ( $Cl_2$ ,  $HClO$ ,  $ClO^-$ ) (reacciones 5, 6 y 7). Para todo esto se aplica corriente entre los electrodos provocando las reacciones químicas deseadas [3, 4, 5]:



El pH alcalino en la región catódica (reacciones 2, 4 y 5) conduce a la precipitación de carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ) e hidróxido de magnesio ( $Mg(OH)_2$ ), en aguas incrustantes con alto contenido de iones de calcio y magnesio. La tecnología permite prevenir esta situación mediante la inversión de la polaridad, de tal modo que el cátodo pasa a funcionar como ánodo, permitiendo que la cal formada se redisuelva por efecto del pH ácido en torno al ánodo (reacción 1) [6].

Hay que destacar que en el límite de fase entre los electrodos y el agua se producen radicales  $OH^\cdot$ . Normalmente, en este tipo de reacciones parte de los protones  $H^+$  se pierden en forma de  $H_2$ , por lo que el agua tiende a aumentar su pH. Pero cuando los grupos hidroxilos generados se consumen como desinfectante el agua tratada disminuye su pH [7]. Una vez desinfectada el agua, los iones hidroxilo dejan de reaccionar y quedan en el agua como desinfectante residual. Se hace necesario modular las citadas reacciones para que finalmente y tras haber desinfectado el agua, esta quede equilibrada (si no se detuvieran las reacciones una vez desinfectada, el agua tendería a ir subiendo su pH). Esta cualidad tiene como consecuencia un relativo efecto tampón en el tratamiento.

## 2. Generación de cloro libre.

Una de las especies químicas generadas como biocida es el cloro, ya sea en su forma molecular ( $Cl_2$ ) o en forma de cloro libre ( $HOCl$ ,  $OCl^-$ ) (reacción 8). El cloro libre es una forma genérica de hablar de las formas reactivas del cloro, sin embargo es importante distinguir entre ellas ya que su capacidad biocida es muy diferente. Mientras que  $HOCl$  es una molécula muy reactiva, el  $OCl^-$  lo es mucho menos y la forma en que se presente en el agua va a depender fundamentalmente del pH [8].



De esta manera, en un pH neutro el cloro libre se repartirá en un equilibrio del 50% en cada una de sus formas, mientras que a un pH más ácido el equilibrio se desplazará hacia  $HOCl$  y a un pH más básico el equilibrio tenderá hacia la forma de  $OCl^-$  [9].

## 3. Diseño del sistema de desinfección de agua de consumo.

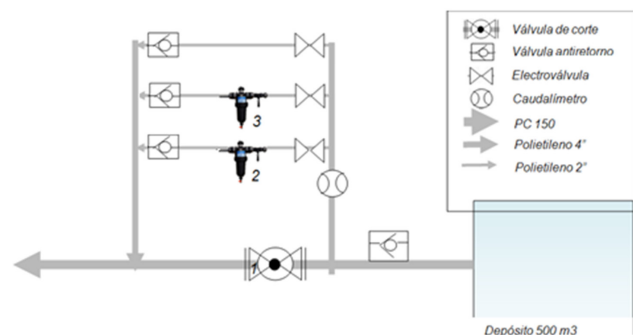
El sistema de desinfección se diseñó para un caudal medio de  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ , proveniente de un depósito de  $500 \text{ m}^3$  donde se almacena el agua de un pozo. Este se dimensionó para cubrir completamente las necesidades de una estación de tratamiento de agua potable (ETAP).

El sistema de desinfección consistió en dos reactores que producen cloro libre a partir de los cloruros presentes en el agua. Se pretende que el cloro libre permanezca en el agua de forma residual, de tal manera que complemente la desinfección realizada en el propio reactor al quedar como oxidante en el agua. No es necesario para este procedimiento añadir sal ni productos químicos. El nivel de cloro producido depende de la programación de los equipos y de los cloruros presentes en el agua a potabilizar. Mientras que el nivel mínimo de cloro producido depende de los factores comentados, los reactores empleados están diseñados para impedir el rebase del nivel máximo. De esta manera, se garantiza un rango de producción de cloro que va desde  $0,01 \text{ mg/L}$  hasta  $0,5 \text{ mg/L}$  en el punto de consumo.

La instalación fue diseñada de tal forma que los reactores trabajasen en *bypass* sobre la tubería principal de suministro. El caudal máximo de paso a través de los reactores fue de  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ , mientras que en la localidad más próxima se registraron consumos máximos de  $43 \text{ m}^3/\text{h}$ . Por este motivo, el *bypass* contó con una tercera ramificación por la que se derivó el caudal que excedía

los 30 m<sup>3</sup>/h. Cuando esta situación se daba, los sistemas hipercloraron en los 30 m<sup>3</sup>/h que circulan en su interior, para garantizar la concentración de cloro deseada también en los momentos de máximo consumo.

El esquema de la instalación fue el siguiente:



**Figura 1. Esquema de la instalación del sistema de tratamiento.**

En la tubería de polietileno de 4" se instaló un sistema automático, que en función de los datos registrados por el caudalímetro gobernó la apertura o cierre de las electroválvulas instaladas sobre la tubería de 2" de tal modo que:

- A caudales  $\leq 15$  m<sup>3</sup>/h, todo el flujo circuló a través de la línea 1.
- A caudales  $15 \text{ m}^3/\text{h} < x \leq 30 \text{ m}^3/\text{h}$  se abrió la electroválvula de la línea 2 repartiéndose el flujo entre ambas líneas al 50%.
- A caudales  $> 30 \text{ m}^3/\text{h}$  se abrió la electroválvula de la línea 3 repartiéndose el caudal al 33,3 % entre las tres líneas.

La instalación de válvulas antiretorno garantizó, que las tuberías donde se alojan los sistemas electroquímicos permanecieran siempre en carga.

La instalación se calibró y gobernó mediante un software de control, que permitía regular la producción de cloro libre para llegar a la concentración deseada, teniendo en cuenta la distancia desde los reactores hasta los puntos de control. En este caso, el punto de control más lejano se encontraba a unos 720 m del punto estimado para la instalación de los reactores. Las mediciones se realizaron tanto en el influente como el efluente.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la caracterización analítica del agua de red se detallan en la tabla I.

**Tabla I. Resultados caracterización analítica del agua de la red.**

Parámetro	Valor	Unidades
Turbidez	< 0.05	UNT
pH	7.6	u. pH
Conductividad a 20°C	580	µs/cm
Cloruros	41	mg/L
Sulfatos	50	mg/L
Amonio	< 0.05	mg/L
Nitritos	< 0.01	mg/L
Oxidabilidad al permanganato	0.9	mg/L
Dureza Total	33	° F
Índice de Langelier a 20°C	0.50	
Sodio	22	mg/L
Hierro	< 5	µg/L
Manganeso	< 2	µg/L
Escherichia coli	0	nmp/100 ml
Aerobios totales a 22°C	< 1	ufc/100 ml

El agua de la red presenta una buena calidad, con poca presencia de reductores y bacterias, por lo que en consecuencia presenta una baja oxidabilidad. El índice de Langelier indica un agua con ligera tendencia incrustante, lo que con un aumento de la temperatura o del pH puede originar precipitaciones y por tanto presencia de biocapas. El nivel de cloruros es bajo, lo que limita el nivel de producción de cloro libre electroquímicamente.

Tras detener la dosificación de hipoclorito, se realizó la puesta en marcha de los reactores y se comenzó a medir el cloro libre producido. Las medidas se tomaron en cada uno de los reactores, en la mezcla global de agua y en una fuente pública situada a unos 700 m del punto de tratamiento.

Los valores registrados se detallan en la tabla II.

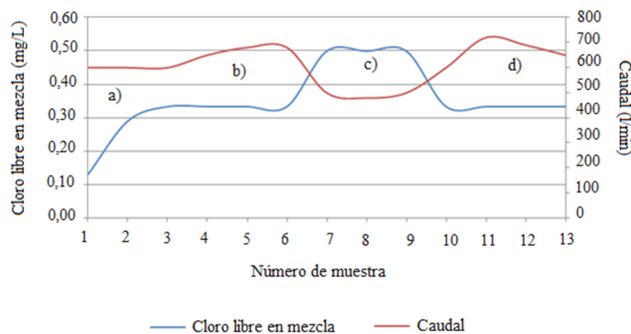
**Tabla II. Valores de las mediciones del cloro libre producido**

Caudal (l/min)	Cl <sub>2</sub> (mg/L)			
	Reactor-1	Reactor-2	Mezcla	Fuente
600	0,21	0,18	0,13	0,00
600	0,42	0,43	0,29	0,14
600	0,50	0,50	0,33	0,10
650	0,49	0,50	0,33	0,17
680	0,50	0,49	0,33	0,19
680	0,50	0,49	0,33	0,14
500	0,50	0,50	0,50	0,28

480	0,50	0,50	0,50	0,32
500	0,50	0,50	0,50	0,42
600	0,49	0,49	0,33	0,16
720	0,50	0,50	0,33	0,10
690	0,50	0,50	0,33	0,15
650	0,50	0,50	0,33	0,24

Para interpretar los resultados es preciso tener en cuenta que a través de los reactores circuló un caudal máximo de 250 l/min, de tal forma que cuando el consumo es igual o menor de 500 l/min, todo el agua pasa a través de los reactores mientras que si el consumo es superior a los 500 l/min, solo 2/3 del caudal circulan a través de los sistemas.

Observando la figura 2 que representa la relación gráfica existente entre el caudal y cloro libre en la mezcla, se puede explicar la sucesión de hechos acontecidos:



**Figura 2. Relación entre el cloro libre detectado en la mezcla y el caudal**

Observando la relación entre ambas representaciones (cloro libre en mezcla y caudal), se pueden apreciar 4 zonas bien diferenciadas:

Zona a: Corresponde al arranque de la instalación. En esta franja se mantuvo un consumo elevado, siempre superior a 500 l/min, por lo que únicamente 2/3 del caudal circularon a través de los reactores. Durante este espacio de tiempo los equipos funcionaron con la programación que traían de fábrica. El reactor 1 empezó produciendo 0,21 mg/L de cloro libre y el reactor 2 produjo 0,18 mg/L. Por efecto de la dilución por consumo elevado, la media registrada en la mezcla de agua fue de 0,13 mg/L. Siendo claramente insuficiente esta producción de cloro se procedió a aumentarla, modificando la programación de tal modo que las medidas registradas para el reactor 1, 2 y mezcla fueron 0,42, 0,43 y 0,29 respectivamente. Zona b: Se consiguió elevar la producción de cloro hasta 0,5 mg/L, sin embargo el consumo continuó siendo elevado (> 500 l/min), por lo que únicamente 2/3 del caudal circularon a través de los reactores. A

consecuencia de esto el nivel medio de cloro libre en la mezcla fue de 0,33 mg/L.

Zona c: El consumo fue  $\leq 500$  l/min por lo que el 100% del caudal circuló a través de los reactores. Como consecuencia de esto la producción de cloro libre de ambos reactores (0,5 mg/L), se mantuvo en la mezcla global del agua demandada.

Zona d: En esta zona el consumo fue superior a 500 l/min por lo que de nuevo únicamente 2/3 del caudal circularon a través de los reactores, por lo que el cloro libre detectado en la mezcla fue de 0,33 mg/L.

Los sistemas electroquímicos empleados están diseñados para limitar la producción de cloro libre, por lo que en ningún momento se pudo superar los 0,5 mg/L de cloro libre producido. Restando a esto la dilución producida en los momentos de consumo superior a 500 l/min, y las pérdidas de cloro a lo largo de la tubería, el valor medio de cloro detectado en el punto de consumo fue de 0,18 mg/L con un valor máximo de 0,32 mg/L registrado en un momento de consumo inferior a 500 l/min. Dada la imposibilidad de mantener niveles mínimos de 0,4 mg/L en el punto de consumo, tal y como manda la normativa española, se decidió reactivar la dosificación de hipoclorito. Tras activar la dosificación de hipoclorito, se ideó un método para poder esquivar la limitación de producción de cloro por parte de los reactores. Estas pruebas ocasionaron un problema de sobrecalentamiento en la bomba por lo que hubo que detenerlas.

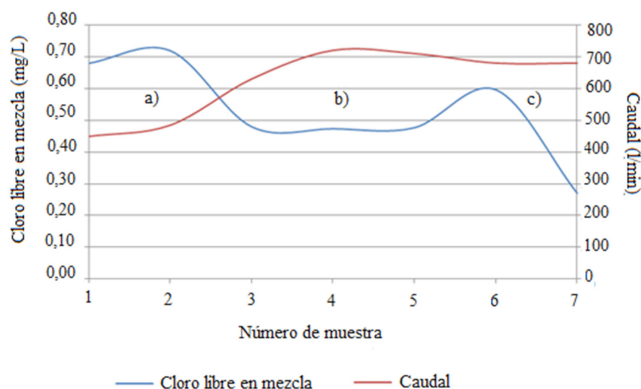
Tras estudiar la situación, se detectó un modo de *bypasear* los mecanismos de limitación de la producción de cloro, por lo que se procedió a un nuevo intento *in situ*. Tras realizar las modificaciones pertinentes, se procedió a reanudar las pruebas obteniendo los resultados de la tabla III.

**Tabla III. Valores de las mediciones del cloro libre producido**

Caudal (l/min)	Cl <sub>2</sub> (mg/L)			
	Reactor-1	Reactor-2	Mezcla	Fuente
450	0,65	0,71	0,68	0,56
485	0,74	0,70	0,72	0,62
630	0,72	0,72	0,48	0,25
720	0,69	0,73	0,47	0,31
710	0,71	0,72	0,48	0,34
680	0,90	0,89	0,60	0,41
680	0,00	0,81	0,27	0,20



Como se puede observar, tras las modificaciones se obtuvo un valor medio de 0,52 mg/L en la mezcla. No obstante, si no se contase el último valor registrado donde la producción de cloro por parte del reactor 1 fue 0 (por motivos que se explicarán a continuación), el valor medio registrado en la mezcla hubiera sido de 0,57 mg/L. Sin contar este último dato el valor medio detectado en el punto de consumo fue de 0,41 mg/L.



**Figura 3. Relación entre el cloro libre detectado en la mezcla y el caudal**

Observando la relación entre ambas representaciones (cloro libre en mezcla y caudal), se pueden apreciar 3 zonas claramente diferenciadas:

Zona a: Todo el caudal circuló a través de los reactores, por lo que se consiguió un alto valor de cloro libre en el caudal global (0,7 mg/L de media).

Zona b: La producción de cloro en los reactores se mantuvo igual que en la zona a, sin embargo el consumo fue superior a los 500 l/min, por lo que el cloro libre en la mezcla fue más bajo (0,48 mg/L de media).

Zona c: Dado que en la zona b la producción de cloro no fue suficiente para conseguir más de 0,4 mg/L en el punto de consumo (se obtuvo 0,30 mg/L de media), se intentó incrementar la producción de cloro en los reactores. De esta se registraron valores de 0,9 y 0,89 mg/L en los reactores 1 y 2 respectivamente, que generaron en la mezcla un valor de 0,6 mg/L y en la fuente un valor de 0,41 mg/L. En la figura 3 se puede observar un pico en el cloro detectado en la muestra 6, sin embargo a continuación se observa una drástica caída. Ésta caída se debió a la rotura de los rectificadores del reactor número 1, por efecto del sobrecalentamiento ocasionado por el bypass realizado y el sobreesfuerzo al que fue sometido. A consecuencia de esto no se detectó producción de cloro en este reactor.

## IV. CONCLUSIONES

1. Debido a las características técnicas de los reactores utilizados, los cuales están diseñados para limitar la producción de cloro libre, inicialmente fue imposible mantener los niveles mínimos de 0,4 mg/L en el punto de consumo, tal y como se pretendía. Una vez que se pudieron modificar los mecanismos de limitación de la producción, se consiguió mantener los niveles mínimos de cloro libre residual.

2. Aun no tratándose de una técnica de electrocloración, tanto el diseño del sistema de tratamiento como la tecnología empleada han resultado eficaces en la desinfección de agua potable, vía acción biocida electroquímica múltiple. Sin embargo, estos dependerán en gran medida de los límites de cloro libre que se deseen mantener durante el tratamiento.

3. En el caso de un límite máximo de cloro libre, el diseño y la aplicación de la tecnología son totalmente válidos. Si por el contrario se requiere en el punto de consumo de un mínimo de cloro libre residual (0,4 mg/L), habría que desarrollar y probar otro diseño ya que los reactores utilizados no están diseñados para funcionar como simples electrocloradores, en sustitución de un proceso de dosificación de cloro prefabricado por un proceso de dosificación de cloro producido *in situ*.

## V. REFERENCIAS

- Scialdone O, et al, Electrochemical abatement in water: Reduction, oxidation and combined processes, Journal Electrochim Acta, vol. 55, no. 3, 2010, pp 701–708.
- Celeste I, Bueno P, Dino E, Studies on the electrochemical disinfection of water containing Escherichia coli using a Dimensionally Stable Anode, Brazilian Archives of Biology and Technology, vol. 53, no.5, 2010, pp. 1235-1244.
- Basiriparsa J. and Abbasi M. High-efficiency ozone generation via electrochemical oxidation of water using Ti anode, Journal of Solid State Electrochemistry, vol. 16, no. 3, 2012, pp. 1011–1018.
- Sanchez-Carretero A, et al, Electrochemical production of perchlorates using conductive diamond electrolyses, Chemical Engineering Journal, vol. 166, 2011, pp.710–714.
- Bougeard C., et al, Comparison of the disinfection by product formation potential of treated waters exposed to

chlorine and monochloramine, *Journal Water research*, vol. 44, no. 3, 2010, pp 729-740.

6. Reimanis, M., J. Malers, J. Ozolins, Preparation of water using electrochemical processes, *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*, World Academy of Research and Publication Press, vol. 1, 2010, pp. 35-39.

7. Reimanis, M., Malers, J., Ozolins, J. Preparation of water using Electrochemical Processes, *International Journal Chemical Environmental Engineering*, World

*Academy res. publ. Press.*, vol. 1, no. 1, 2010, pp. 35-39.

8. Goslan E., et al, A comparison of disinfection by-products found in chlorinated and chloraminated drinking waters in Scotland, *Journal Water research*, vol. 43, no. 18, 2009, pp. 4698-4706.

9. Vacca A, et al, Electrochemical treatment of water containing chlorides under non-ideal flow conditions with BDD anodes, *Journal Applied Electrochemistry*, vol. 41, no.9, 2011, pp.1087–1097.