



GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis de eficiencia de métodos de electroporación y cloración para desinfección de efluentes residuales.

Autor: Camilo Pereira Alonso

Director: Carlos Morales Polo

Co-Director: Luis Botija Ibáñez

Madrid

Julio de 2020



AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Camilo Pereira Alonso _____

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE MÉTODOS DE ELECTROPORACIÓN Y CLORACIÓN PARA DESINFECCIÓN DE EFLUENTES RESIDUALES, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que



pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 15 de julio de 2020

ACEPTA

Fdo. Camilo Pereira Alonso

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE MÉTODOS DE ELECTROPORACIÓN Y CLORACIÓN PARA DESINFECCIÓN DE EFLUENTES RESIDUALES

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2019-2020 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Camilo Pereira Alonso

Fecha: 15/ 07/ 2020

Una firma manuscrita en tinta negra que parece decir "Camilo".

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.:

Fecha: 15/ 07/ 2020



ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE MÉTODOS DE ELECTROPORACIÓN Y CLORACIÓN PARA DESINFECCIÓN DE EFLUENTES RESIDUALES.

Autor: Pereira Alonso, Camilo

Director: Morales Polo, Carlos

Co-director: Botija Ibáñez, Luis

Entidad colaboradora: Geodesic Innovations

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción

Geodesic Innovations es una empresa que ha desarrollado la tecnología más avanzada del mercado para la desinfección y conservación del agua. Sus equipos, cuyo funcionamiento explicaremos detalladamente más adelante, son capaces de ejecutar de forma autónoma su mantenimiento preventivo, y poseen un diseño completamente modular que les permite abarcar todo tipo de caudales de agua.

En los equipos se lleva a cabo un proceso de electroporación y un proceso de oxidación avanzada. La electroporación es un mecanismo electrofísico que tiene como objetivo principal la eliminación de bacterias; los campos eléctricos generados en el equipo provocan el desequilibrio electroosmótico de la membrana celular bacteriana, provocando su ruptura y la muerte de las bacterias. Por otro lado, la aplicación de estos campos eléctricos provoca las reacciones de oxidación natural. Con este método, los propios equipos son capaces de generar cloro activo a partir de los cloruros presentes en el agua. Todos los equipos están conectados a una plataforma de gestión remota CB-OPCON, también diseñada por Geodesic, que permite la automatización del mantenimiento y minimiza los requisitos de operación, logística y mantenimiento.

Gracias al uso de esta innovadora técnica Geodesic, independientemente de su campo de aplicación (piscinas y spas, torres de refrigeración, y redes de agua y distribución), observa tres ventajas principales frente a los sistemas tradicionales: eliminan totalmente los productos químicos presentes en el agua; flexibilizan la estrategia de tratamiento del agua y su registro, controlando y monitorizando la instalación desde cualquier lugar gracias al CB-OPCON; y ahorran hasta el 90% del agua.



Actualmente los equipos están trabajando en piscinas y spas, torres de refrigeración, y en redes de agua regenerada. Entre otras posibles aplicaciones que se están estudiando para su implementación en un futuro cercano encontramos la regeneración de agua en trenes de pasteurización, la reutilización de agua en procesos industriales, la regeneración de agua en cadenas de lavado de envases, ... Este trabajo de investigación va a estar centrado principalmente en el campo de tratamiento de agua residuales; en concreto para ver la eficacia de la desinfección de agua residual para su posterior vertido al medio edáfico.

A continuación, se enumeran los principales objetivos de este trabajo:

Como principal objetivo: comprobar la eficiencia de la electroporación y la cloración para la desinfección de efluentes residuales para su posterior vertido al medio edáfico.

Paralelamente, se van a proponer posibles mejoras para este método, como la posibilidad de la aplicación de campos pulsados.

Por último, se va a llevar a cabo un estudio de desinfección del método de la Legionella, bacteria que causa una enfermedad respiratoria llamada legionelosis.

Metodología

Para cumplir los objetivos del proyecto propuestos se han obtenido una serie de datos que permitirán llevar a cabo los estudios pertinentes.

En cuanto al primer objetivo: se ha estudiado la eficacia de la electroporación aislada para distintos caudales de agua en cuanto a la eliminación de la bacteria *Escherichia coli*, de virus (colífagos), de esporas, de clostridium (generador de spora) y de coliformes fecales. Además, se ha recogido la concentración de subproductos del cloro a la entrada de los reactores y a la salida para los distintos caudales, para estudiar si en la electroporación se generan o no más subproductos procedentes del cloro.

Al observar los resultados se aprecia que la eficacia de desinfección para esporas y clostridium no es la deseada, por lo que se ha repetido el proceso para caudales de 15 y 20 m³/h, pero esta vez dejando un tiempo para que el cloro generado en el propio proceso de electroporación ejerza su poder de desinfección. Los datos se han tomado dejando un tiempo de 20 minutos entre medidas, desde tiempo cero hasta una hora.



Por otro lado, para ver la eficacia de la aplicación de campos pulsados, se ha medido, para caudales de 10 y 15 m³/h, la concentración a la salida de *Escherichia coli* y de coliformes totales con distintos tiempos de aplicación de corriente. Además, se han tomado datos de la cantidad de cloro libre en el agua en cada momento según el tiempo que esté activo el campo eléctrico.

Sobre el estudio de la Legionella, se ha llevado a cabo un proceso similar al primero: para un caudal de 15 m³/h se ha medido la concentración de Legionella a la entrada y a la salida del proceso de electroporación y una hora después del tratamiento (cuando el cloro generado ya ha actuado).

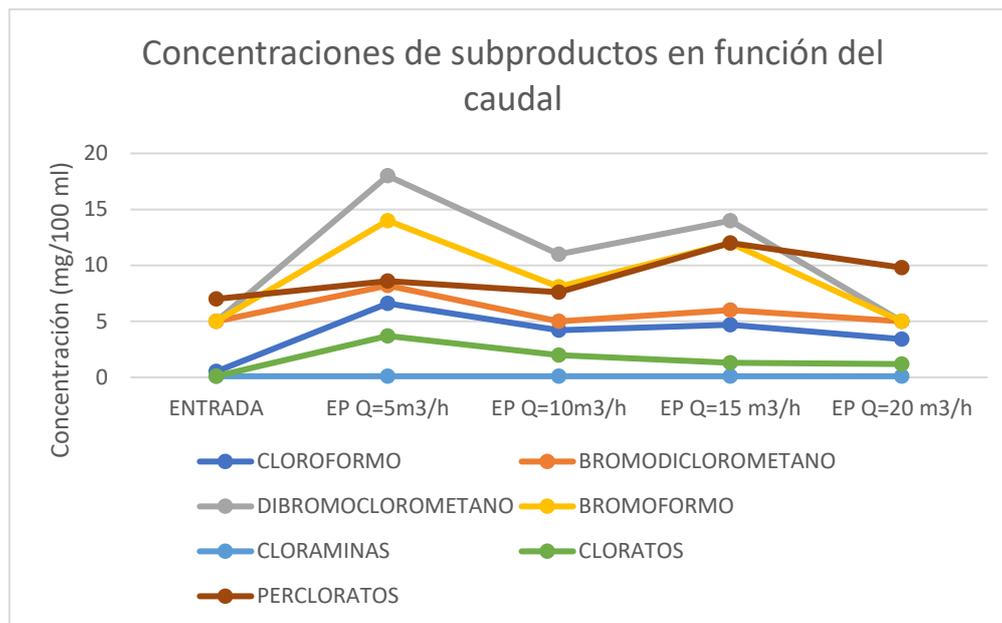
Resultados

- **Estudio general del método de electroporación**

Estudio de subproductos afectados por la electroporación en función del caudal

En esta tabla y esta gráfica se recogen las concentraciones de subproductos, la mayoría de ellos derivados del cloro, antes y después de la electroporación, para caudales de 5, 10, 15 y 20 m³/h.

	ENTRADA	EP Q=5 m ³ /h	EP Q=10 m ³ /h	EP Q=15 m ³ /h	EP Q=20 m ³ /h
CLOROFORMO	0,52	6,6	4,2	4,7	3,4
BROMODICLOROMETANO	<5	8,2	<5	6	<5
DIBROMOCLOROMETANO	<5	18	11	14	<5
BROMOFORMO	<5	14	8,1	12	<5
CLORAMINAS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
CLORATOS	<0,1	3,7	2	1,3	1,2
CLORITOS (µg/l)	<50	<50	<50	<50	<50
PERCLORATOS	7	8,6	7,6	12	9,8



Se aprecia como en los casos del cloroformo, bromodichlorometano, dibromoclorometano, bromoformo y cloratos la concentración a la salida es mayor cuanto menor sea el caudal de tratamiento; en los casos de las cloraminas y de los cloritos (no mostrados en la gráfica) la concentración es independiente del caudal y se mantiene constante en todo momento; y en el caso de los percloratos, la concentración parece aumentar a medida que aumenta el caudal de tratamiento.

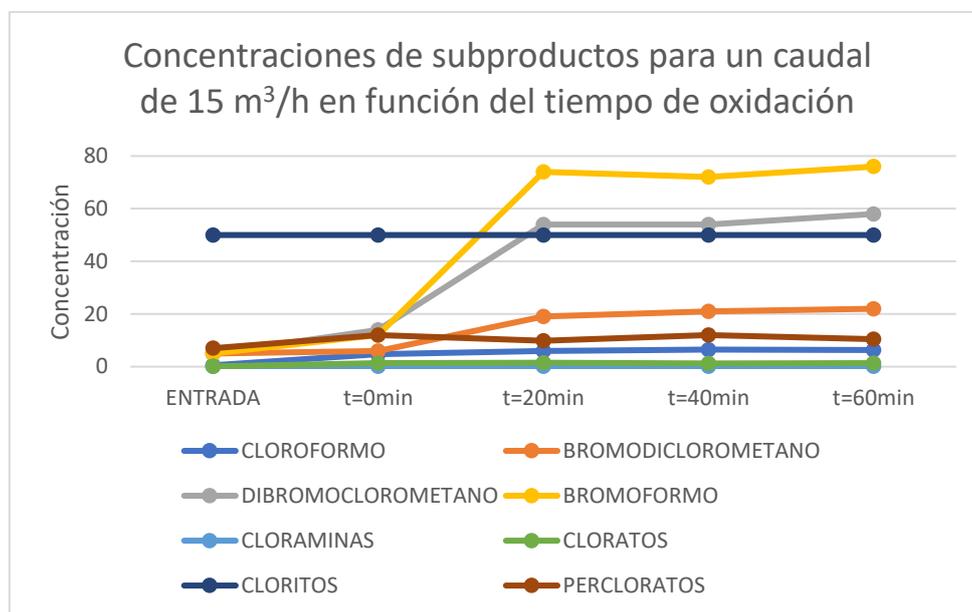
Estudio de subproductos afectados por la electroporación y el tiempo de oxidación

En esta tabla y esta gráfica se muestran las concentraciones de subproductos para un caudal de 15 m³/h habiendo dejado que ejerza su poder de oxidación el cloro generado durante la electroporación. Las medidas se han tomado dejando un tiempo de retención entre medida y medida de 20 minutos, hasta llegar a una hora.

	ENTRADA	EP Q=15m ³ /h t=0min	EP Q=15m ³ /h t=20min	EP Q=15m ³ /h t=40min	EP Q=15m ³ /h t=60min
CLOROFORMO	0,52	4,7	6	6,5	6,3
BROMODICLOROMETANO	<5	6	19	21	22
DIBROMOCLOROMETANO	<5	14	54	54	58
BROMOFORMO	<5	12	74	72	76
CLORAMINAS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
CLORATOS	<0,1	1,3	1,5	1,2	1,3
CLORITOS (µg/l)	<50	<50	<50	<50	<50

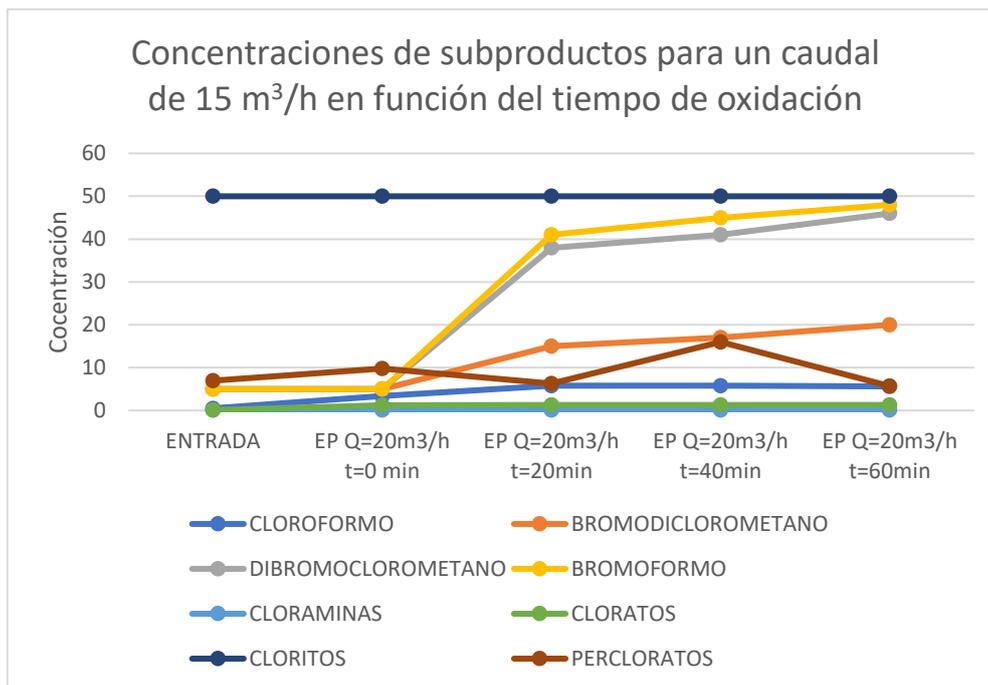


PERCLORATOS	7	12	9,8	12	10,4
--------------------	---	----	-----	----	------



A continuación, se muestran las concentraciones de subproductos para un caudal de 20 m³/h habiendo dejado que ejerza su poder de oxidación el cloro generado durante la electroporación. Como antes, las medidas se han tomado dejando un tiempo de retención entre medida y medida de 20 minutos, hasta llegar a una hora.

	ENTRADA	EP Q=20m ³ /h t=0 min	EP Q=20m ³ /h t=20min	EP Q=20m ³ /h t=40min	EP Q=20m ³ /h t=60min
CLOROFORMO	0,52	3,4	5,8	5,8	5,6
BROMODICLOROMETANO	<5	<5	15	17	20
DIBROMOCLOROMETANO	<5	<5	38	41	46
BROMOFORMO	<5	<5	41	45	48
CLORAMINAS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
CLORATOS	<0,1	1,2	1,3	1,3	1,3
CLORITOS (µg/l)	<50	<50	<50	<50	<50
PERCLORATOS	7	9,8	6,3	16	5,7



Al ver las tablas y las gráficas, se puede concluir, que en cuanto a subproductos generados se refiere, lo óptimo es conseguir un caudal alto de tratamiento y un tiempo corto de oxidación; de esta manera se consigue que el aumento de concentración de subproductos debido a la electroporación y a la oxidación sea mínimo.

Efecto de desinfección de la electroporación en función del caudal

Esta tabla muestra las medidas de concentración de los microorganismos que se desean eliminar a la entrada y a la salida de los reactores para caudales de 5, 10, 15 y 20 m³/h respectivamente.

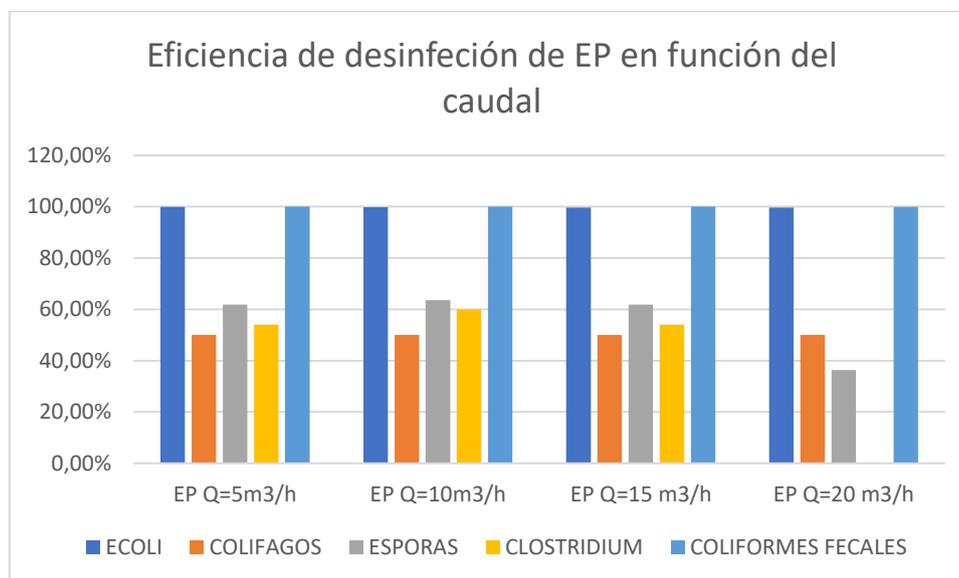
	ENTRADA	EP Q=5 m ³ /h	EP Q=10 m ³ /h	EP Q=15 m ³ /h	EP Q=20 m ³ /h
E COLI	18000	15	42	49	54
COLIFAGOS	2	<1	1	<1	<1
ESPORAS	1100	420	400	420	700
CLOSTRIDIUM	1000	460	400	460	1000
COLIFORMES FECALES	100000	1	2	2	12

Con estas medidas, se ha calculado el rendimiento de desinfección del proceso de electroporación para estos microorganismos, obteniendo los siguientes resultados:

	REDUCCIÓN DESINFECCIÓN EP			
	EP Q=5 m ³ /h	EP Q=10 m ³ /h	EP Q=15 m ³ /h	EP Q=20 m ³ /h
E COLI	99,92%	99,77%	99,73%	99,70%



COLIFAGOS	>50%	50,00%	>50%	>50%
ESPORAS	61,82%	63,64%	61,82%	36,36%
CLOSTRIDIUM	54,00%	60,00%	54,00%	0,00%
COLIFORMES FECALES	99,999%	99,998%	99,998%	99,988%



Se aprecia que la eficacia de eliminación de *Escherichia coli* y coliformes fecales es extraordinaria, independientemente del caudal de tratamiento. El rendimiento de eliminación de colífagos está en torno al 50% sin importar el caudal de tratamiento; este rendimiento parece bajo a priori, pero viendo que la concentración de entrada es únicamente de 2 unidades/100 ml, se puede considerar suficiente este rendimiento. Por último, en cuanto a la desinfección de esporas y de clostridium, los rendimientos para los caudales más bajos (5,10 y 15 m³/h) están en torno a un 60%, mientras que para el caudal de 20 m³/h la reducción de esporas baja a un 36% y la de clostridium es nula. Viendo la concentración a la entrada de estos organismos, la eficacia de desinfección obtenida de los ensayos realizados parece que no es suficiente.

Efecto de desinfección de la electroporación en función del caudal y del tiempo de oxidación

Como se ha dicho previamente, al observar los resultados de estos primeros ensayos, la eficacia de desinfección del método para esporas y clostridium no es la deseada. Como consecuencia, se ha decidido repetir el mismo proceso para caudales de 15 y de 20 m³/h, pero esta vez dejando un tiempo para que el cloro generado en el propio proceso de electroporación pudiese ejercer su poder de desinfección, actuando de este modo la



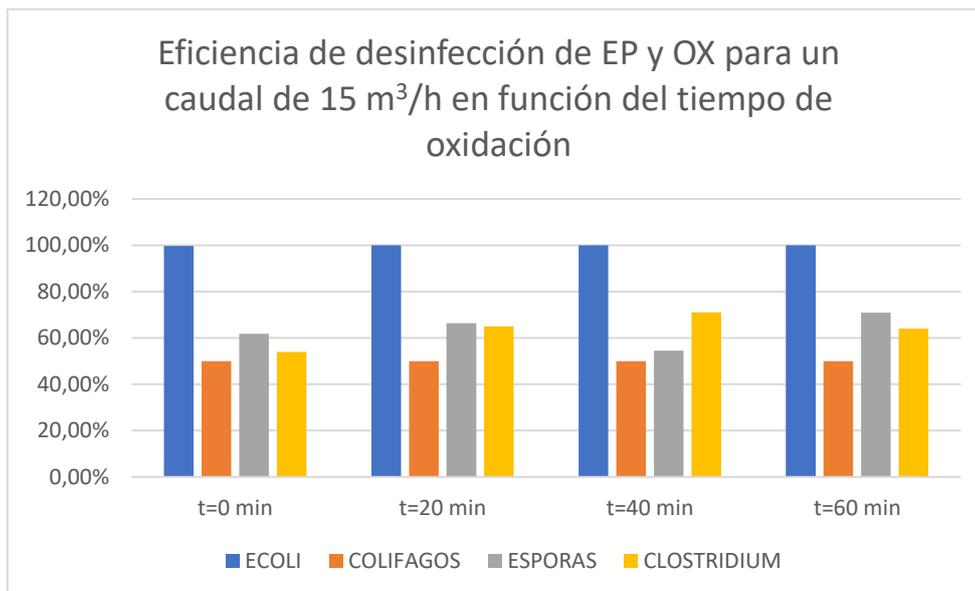
oxidación además de la electroporación. Estas nuevas medidas se han tomado dejando un tiempo de retención entre medida y medida de 20 minutos, partiendo de tiempo cero hasta llegar a una hora.

	ENTRADA	EP Q=15m ³ /h t=0min	EP Q=15m ³ /h t=20min	EP Q=15m ³ /h t=40min	EP Q=15m ³ /h t=60min
E COLI	18000	49	2	3	<1
COLIFAGOS	2	<1	<1	<1	<1
ESPORAS	1100	420	370	500	320
CLOSTRIDIUM	1000	460	350	290	360

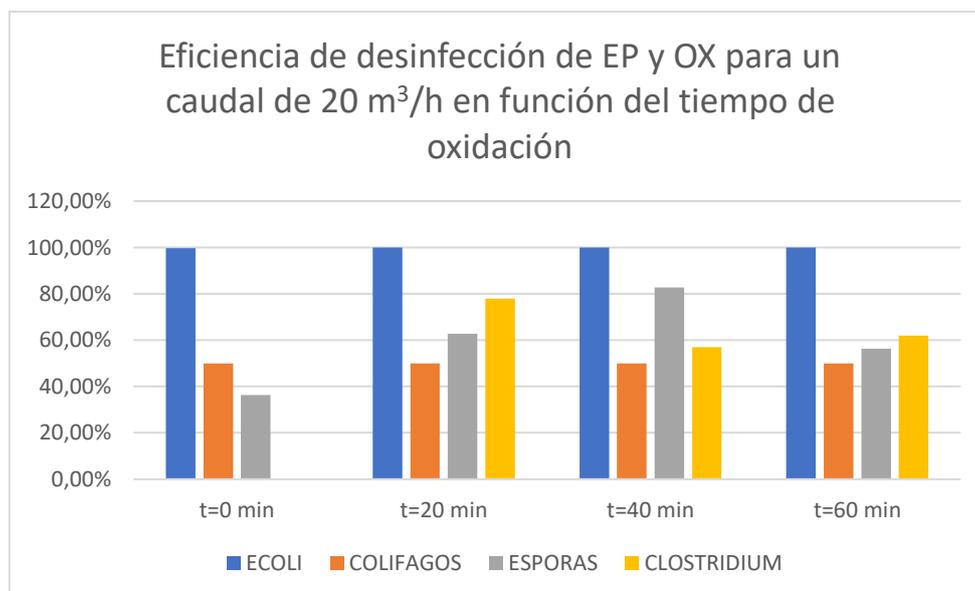
	ENTRADA	EP Q=20m ³ /h t=0 min	EP Q=20m ³ /h t=20min	EP Q=20m ³ /h t=40min	EP Q=20m ³ /h t=60min
E COLI	18000	54	<1	<1	<1
COLIFAGOS	2	<1	<1	<1	<1
ESPORAS	1100	700	410	190	480
CLOSTRIDIUM	1000	1000	220	430	380

A la vista de las dos tablas anteriores, se han calculado los rendimientos de desinfección para ambos caudales dejando que actúe la oxidación durante una hora. Se han obtenido los siguientes resultados:

	REDUCCIÓN DESINFECCIÓN EP+OX (Q=15 m ³ /h)			
	t=0 min	t=20 min	t=40 min	t=60 min
E COLI	99,73%	100,00%	100,00%	100,00%
COLIFAGOS	>50%	>50%	>50%	>50%
ESPORAS	61,82%	66,36%	54,55%	70,91%
CLOSTRIDIUM	54,00%	65,00%	71,00%	64,00%



REDUCCIÓN DESINFECCIÓN EP+OX (Q=20 m ³ /h)				
	t=0 min	t=20 min	t=40 min	t=60 min
E COLI	99,70%	100,00%	100,00%	100,00%
COLIFAGOS	>50%	>50%	>50%	>50%
ESPORAS	36,36%	62,73%	82,73%	56,36%
CLOSTRIDIUM	0,00%	78,00%	57,00%	62,00%



Observando de nuevo los rendimientos de desinfección: la eficacia de eliminación de *Escherichia coli* para ambos caudales (15 y 20 m³/h) pasa a ser del 100% independientemente del tiempo de oxidación que se deje posterior a la electroporación.



Por otro lado, la desinfección de colifagos sigue en los valores anteriores: no aumenta su valor pese a dejar tiempo de oxidación. Por último, al dejar tiempo de oxidación, se consiguen mejores rendimientos de desinfección de esporas y de clostridium, siendo el caudal óptimo el de 20 m³/h; y el tiempo óptimo de 20 minutos para eliminar clostridium (llegando a eliminar el 78%) y de 40 minutos para eliminar esporas (pudiendo eliminar el 83%). De modo que lo que más nos interesaría en cuanto a eliminación de los microorganismos es tener un caudal de tratamiento elevado y un tiempo de oxidación medio, entre 20 y 40 minutos.

- **Estudio de la eficacia de aplicación de campos pulsados**

Tras los excelentes resultados de desinfección obtenidos en los anteriores ensayos, se va a realizar un estudio de la eficacia del método en cuanto a la eliminación de la bacteria *Escherichia coli* y de coliformes totales cuando el campo eléctrico que se aplica no es continuo, sino que se aplica de manera pulsada en intervalos de tiempo. Además, se va a estudiar la cantidad de cloro libre que queda en el agua tras el tratamiento de electroporación con estos campos pulsados. Estos ensayos se van a realizar para caudales de 10 y de 15 m³/h.

Tras la realización de estos ensayos se observa como en todos los casos, cada uno con sus condiciones de operación, el porcentaje de desinfección es adecuado en todos los casos, estando comprendido en todos ellos entre el 99 y el 100% de desinfección. A su vez, conforme más tiempo está activo el campo, más concentración de cloro libre se mide; esto es lógico, ya que cuanto más tiempo activa esté la electroporación, mayor grado de desinfección tiene lugar, y añadiendo el mismo cloro te queda más cloro libre (sin combinar), ya que no tiene nada con lo que reaccionar. De modo que, cuanto más tiempo esté activa la electroporación, menos cloro hace falta para asegurar la desinfección. También es interesante observar la pendiente de las rectas que se forman y ver cuál de ellas tiene mayor pendiente, lo que a la larga indicará que su concentración de cloro libre podrá ser menor a medida que se disminuya el tiempo de pulsado.

Para el ensayo de caudal 10 m³/h y duración del ciclo 100 ms, las condiciones óptimas de trabajo son una corriente de 100 A y una densidad de corriente de 303,03 A/m², con lo que se obtiene un cloro libre de 0,22 mg/l. Mirándolo desde la perspectiva de conseguir mayor pendiente, el ensayo con condiciones de trabajo de corriente 83 A y densidad de



corriente 251 A/m^2 será el que tenga mejor capacidad de disminuir su concentración de cloro libre a medida que se haga más pequeño el campo activo.

Para el ensayo de caudal $10 \text{ m}^3/\text{h}$ y duración del ciclo 200 ms , las condiciones óptimas de trabajo son una corriente de 66 A y una densidad de corriente de 200 A/m^2 , con lo que se obtiene un cloro libre de $0,16 \text{ mg/l}$. Para estas condiciones también se obtiene la mayor pendiente, de modo que este ensayo será el que tenga mayor capacidad de disminuir su concentración de cloro libre.

Para el ensayo de caudal $10 \text{ m}^3/\text{h}$ y duración del ciclo 300 ms , las condiciones óptimas de trabajo son una corriente de 66 A y una densidad de corriente de 200 A/m^2 , con lo que se obtiene un cloro libre de $0,28 \text{ mg/l}$. Para estas condiciones también se obtiene la mayor pendiente, de modo que este ensayo será el que tenga mayor capacidad de disminuir su concentración de cloro libre.

En el caso de caudal $15 \text{ m}^3/\text{h}$ y duración del ciclo 100 ms , viendo que el porcentaje de desinfección es adecuado sea cual sea el tiempo activo, el punto óptimo de trabajo debería ser el de menos tiempo de campo activo, ya que debería ser el de menor concentración de cloro libre. Sin embargo, se observa que no es así, esto puede deberse a algún error a la hora de medir las concentraciones de cloro libre.

Para el ensayo de caudal $15 \text{ m}^3/\text{h}$ y duración del ciclo 200 ms , las condiciones óptimas de trabajo son una corriente de 83 A y una densidad de corriente de 251 A/m^2 , con lo que se obtiene un cloro libre de $0,2 \text{ mg/l}$. Para estas condiciones también se obtiene la mayor pendiente, de modo que este ensayo será el que tenga mayor capacidad de disminuir su concentración de cloro libre.

- **Estudio de reducción de la Legionella**

Para este último ensayo, para un caudal de $15 \text{ m}^3/\text{h}$ se ha realizado un estudio sobre la eficacia del método en cuanto a la eliminación de la Legionella. Para ello se ha medido la concentración de esta a la entrada y a la salida de las celdas inmediatamente después del proceso de electroporación y tras una hora de espera, una vez que el cloro generado de forma natural en la electroporación ya ha ejercido su capacidad de oxidación.

Entrada	Salida EP (T= 0 h)	Salida EP+OX (T=1 h)
27600	62400	31



5400	6300	68
0	8500	37
22000	50400	0
1780	8900	0
67857	90000	0
54358	80328	469

En la siguiente tabla se aprecia claramente como los valores de concentración de Legionella aumentan tras pasar el agua por las celdas y sufrir la electroporación, estos resultados a primera vista pueden resultar extraños ya que puede no entenderse cómo aumenta la concentración de esta bacteria si el agua está siendo sometida a un proceso de desinfección. La explicación es que gran parte de esta bacteria se encuentra en el interior de unas esporas cuya membrana se destruye en el proceso de electroporación, y es entonces cuando la Legionella se libera de la espora y provoca ese aumento de su concentración.

Aumento de concentración de Legionella entre entrada y salida
126,09%
16,67%
-
129,09%
400,00%
32,63%
47,78%

A continuación, se incluyen una tabla que muestran la eficacia de desinfección de los procesos de electroporación y de oxidación respecto a la salida del equipo (una vez las esporas han sido destruidas por el efecto de la electroporación).

Reducción desinfección EP+OX respecto a la salida (T=0 h)
99,95%
98,92%
99,56%



100,00%
100,00%
100,00%
99,42%

Viendo los resultados, se puede decir que el rendimiento de desinfección es adecuado. En todos los casos el rendimiento de eliminación de Legionella está por encima o roza el 99% de desinfección.

Conclusiones

En cuanto al estudio de la eficacia de desinfección del método de electroporación aislado y del método de electroporación combinado con el proceso de oxidación para la eliminación de ciertos microorganismos nocivos para la salud humana intentando a la vez evitar la formación excesiva de subproductos no deseados, se ha llegado a la conclusión de que para evitar la formación de subproductos no deseados, la mayoría de ellos procedentes del cloro, el tratamiento óptimo para casi todos los casos es realizar la desinfección con caudales de agua elevados ($20 \text{ m}^3/\text{h}$ en nuestro caso) sin dejar tiempo de oxidación tras la electroporación, ya que en muchos de los casos al dejar este tiempo para que se produzca la oxidación, la cantidad de subproductos presentes en el agua a tratar aumenta. Por otro lado, en cuanto al deseo de eliminar ciertos microorganismos perjudiciales para el ser humano, se ha observado que el mejor método de desinfección es tratar caudales elevados de agua (para nosotros $20 \text{ m}^3/\text{h}$) y dejar un tiempo de oxidación medio, entre 20 y 40 minutos de espera dependiendo del microorganismo que se desee eliminar con mejor eficacia. De modo que, para conseguir un equilibrio entre poder de desinfección elevado sin generar un exceso de subproductos, se concluye que las condiciones óptimas de tratamiento son trabajar con caudales altos y tiempos de oxidación bajos (en torno a 20 minutos).

Recopilando las conclusiones sacadas del estudio de la concentración de cloro libre y la eficacia de desinfección del equipo en función del caudal y tiempo de paso, duración del ciclo, corriente de trabajo y densidad de corriente, se aprecia como el porcentaje de desinfección es adecuado en todos los ensayos, estando comprendido en todos ellos entre el 99 y el 100% de desinfección. A su vez, conforme más tiempo está activo el campo, más concentración de cloro libre se mide; esto es lógico, ya que cuanto más tiempo activa



esté la electroporación, mayor grado de desinfección tiene lugar, y añadiendo el mismo cloro te queda más cloro libre (sin combinar), ya que no tiene nada con lo que reaccionar. De modo que, cuanto más tiempo esté activa la electroporación, menos cloro hace falta para asegurar la desinfección, y esto es mejor ya que consigues un agua con menos olor y sabor, menos toxicidad y menos gasto de reactivos químicos. Con lo que concluimos que, para cada caudal y duración del ciclo de los ensayos, viendo que el porcentaje de desinfección es adecuado sea cual sea el tiempo activo, el punto de condiciones óptimas de corriente de trabajo y densidad de corriente será el que menos cloro libre deje en el agua, que coincide con el de menor tiempo de campo activo.

Por último, en relación al estudio sobre el rendimiento de eliminación de Legionella, se observa lo comentado anteriormente, y es que, al ser sometida el agua al proceso de electroporación aislado, la concentración de Legionella crece bruscamente debido a la rotura de las membranas de ciertas esporas que contienen la bacteria, con lo que esta bacteria es liberada al agua residual. A pesar de esto, cuando se deja un tiempo de una hora para que el cloro generado de forma natural durante la electroporación ejerza su potencial de oxidación, se observa una reducción extraordinaria de la concentración de esta bacteria en el agua, rozando en casi todos los casos el 100% de desinfección, ya sea comparando la salida tras electroporación y oxidación con la entrada a los reactores o con la salida tras electroporación únicamente.



EFFICIENCY ANALYSIS OF ELECTROPORATION AND CHLORINATION METHODS FOR THE DISINFECTION OF WASTE EFFLUENTS

Author: Pereira Alonso, Camilo

Director: Morales Polo, Carlos

Co-Director: Botija Ibañez, Luis

Collaborating entity: Geodesic Innovations

PROJECT OVERVIEW

Introduction

Geodesic Innovations is a company that has developed the most advanced technology on the market for water disinfection and conservation. Its equipment, whose operation we will explain in detail later, is capable of performing preventive maintenance autonomously, and has a completely modular design that allows it to cover all types of water flows.

An electroporation process and an advanced oxidation process are carried out on the equipment. Electroporation is an electrophysical mechanism whose main objective is to eliminate bacteria; the electrical fields generated in the equipment cause the electro-osmotic imbalance of the bacterial cell membrane, causing it to break down and the bacteria to die. On the other hand, the application of these electrical fields causes the natural oxidation reactions. With this method, the equipment itself is capable of generating active chlorine from the chlorides present in the water. All the equipment is connected to a CB-OPCON remote management platform, also designed by Geodesic, which allows maintenance automation and minimizes operation, logistics and maintenance requirements.

Thanks to the use of this innovative Geodesic technique, regardless of its field of application (swimming pools and spas, cooling towers, and water and distribution networks), it has three main advantages over traditional systems: it totally eliminates the chemicals present in the water; it makes the water treatment strategy and its registration more flexible, controlling and monitoring the installation from anywhere thanks to CB-OPCON; and it saves up to 90% of water.



Currently the equipment is working in pools and spas, cooling towers, and in regenerated water networks. Among other possible applications that are being studied for implementation in the near future are the regeneration of water in pasteurization trains, the reuse of water in industrial processes, the regeneration of water in container washing chains, ... This research work will be focused mainly on the field of wastewater treatment, specifically to see the effectiveness of disinfection of wastewater for subsequent discharge into the environment.

The main objectives of this work are listed below:

The main objective is to check the efficiency of electroporation and chlorination for the disinfection of waste effluents for subsequent discharge into the soil.

In parallel, possible improvements to this method will be proposed, such as the possibility of applying pulsed fields.

Finally, a study of the disinfection method of Legionella, a bacterium that causes a respiratory disease called legionnaire's disease, will be carried out.

Methodology

In order to meet the proposed project objectives, a series of data have been obtained that will allow the relevant studies to be carried out.

Regarding the first objective: the effectiveness of isolated electroporation for different water flows has been studied in terms of the elimination of *Escherichia coli* bacteria, viruses (coliphages), spores, clostridium (spore generator) and faecal coliforms. In addition, the concentration of chlorine by-products has been collected at the entrance to the reactors and at the exit for the different flows, in order to study whether or not more by-products from chlorine are generated during electroporation.

When observing the results, it can be seen that the disinfection efficiency for spores and clostridium is not the desired one, so the process has been repeated for flows of 15 and 20 m³/h, but this time leaving a time for the chlorine generated in the electroporation process itself to exercise its disinfection power. The data have been taken leaving a time of 20 minutes between measurements, from zero time to one hour.

On the other hand, to see the efficiency of the application of pulsed fields, the concentration of *Escherichia coli* and total coliforms at the outlet has been measured for



flows of 10 and 15 m³/h with different times of current application. In addition, data was taken on the amount of free chlorine in the water at any given time depending on the time the electric field is active.

Regarding the study of Legionella, a process similar to the first one has been carried out: for a flow rate of 15 m³/h, the concentration of Legionella has been measured at the entrance and exit of the electroporation process and one hour after the treatment (when the chlorine generated has already acted).

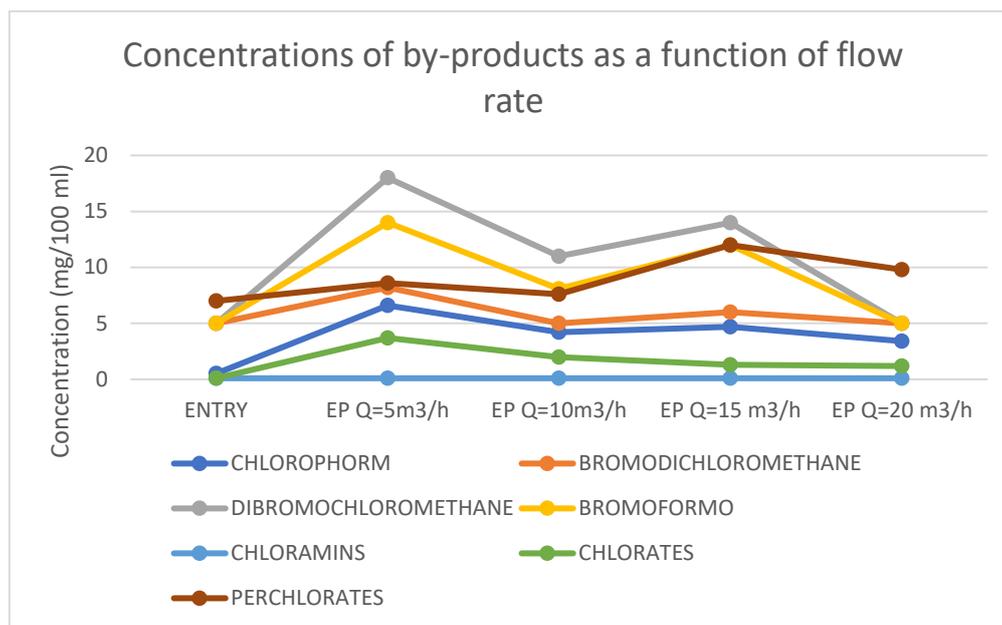
Results

- **General study of the electroporation method**

Study of by-products affected by electroporation as a function of flow

This table and graph show the concentrations of by-products, most of them derived from chlorine, before and after electroporation, for flows of 5, 10, 15 and 20 m³/h.

	ENTRY	EP Q=5 m ³ /h	EP Q=10 m ³ /h	EP Q=15 m ³ /h	EP Q=20 m ³ /h
CHLOROPHORM	0,52	6,6	4,2	4,7	3,4
BROMODICHLOROMETHANE	<5	8,2	<5	6	<5
DIBROMOCHLOROMETHANE	<5	18	11	14	<5
BROMOFORMO	<5	14	8,1	12	<5
CHLORAMINS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
CHLORATES	<0,1	3,7	2	1,3	1,2
CHLORITE (µg/l)	<50	<50	<50	<50	<50
PERCHLORATES	7	8,6	7,6	12	9,8



It can be seen that in the cases of chloroform, bromodichloromethane, dibromochloromethane, bromoform and chlorates, the concentration at the outlet is higher the lower the treatment flow rate; in the cases of chloramines and chlorites (not shown in the graph) the concentration is independent of the flow rate and remains constant at all times; and in the case of perchlorates, the concentration seems to increase as the treatment flow rate increases.

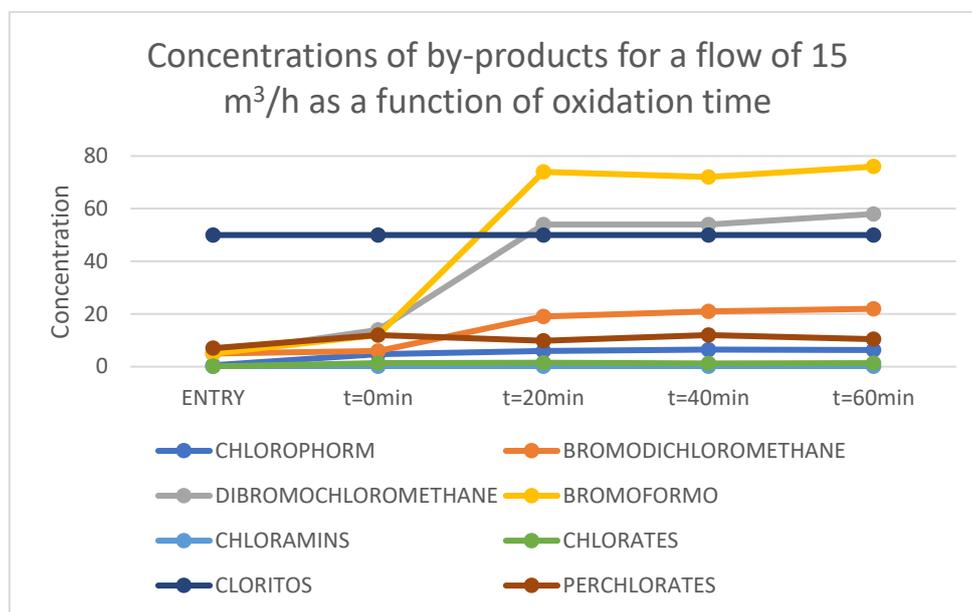
Study of by-products affected by electroporation and oxidation time

This table and graph show the concentrations of by-products for a flow of 15 m³/h having allowed the chlorine generated during electroporation to exert its oxidising power. The measurements have been taken leaving a retention time between measurements of 20 minutes, up to one hour.

	ENTRY	EP Q=15 m ³ /h t=0min	EP Q=15 m ³ /h t=20min	EP Q=15 m ³ /h t=40min	EP Q=15 m ³ /h t=60min
CHLOROPHORM	0,52	4,7	6	6,5	6,3
BROMODICHLOROMETHANE	<5	6	19	21	22
DIBROMOCHLOROMETHANE	<5	14	54	54	58
BROMOFORMO	<5	12	74	72	76
CHLORAMINS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
CHLORATES	<0,1	1,3	1,5	1,2	1,3
CHLORITE (µg/l)	<50	<50	<50	<50	<50

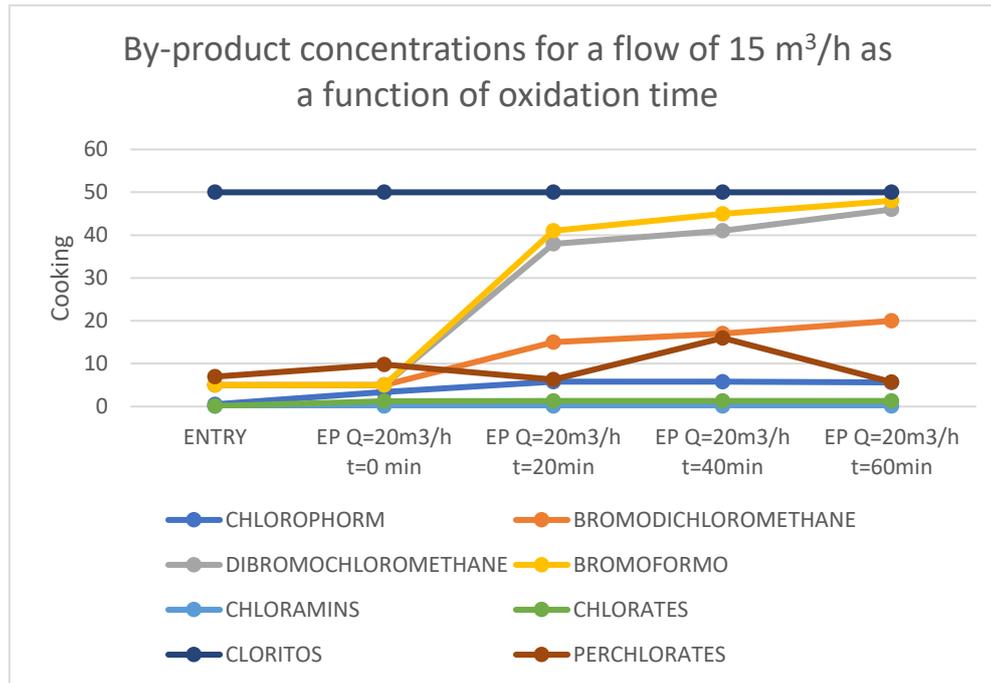


PERCHLORATES	7	12	9,8	12	10,4
---------------------	---	----	-----	----	------



Below are the concentrations of by-products for a flow of 20 m³/h having allowed the chlorine generated during electroporation to exert its oxidation power. As before, the measurements have been taken leaving a retention time between measurements of 20 minutes, up to one hour.

	ENTRY	EP Q=20m ³ /h t=0min	EP Q=20m ³ /h t=20min	EP Q=20m ³ /h t=40min	EP Q=20m ³ /h t=60min
CHLOROPHORM	0,52	3,4	5,8	5,8	5,6
BROMODICHLOROMETHANE	<5	<5	15	17	20
DIBROMOCHLOROMETHANE	<5	<5	38	41	46
BROMOFORMO	<5	<5	41	45	48
CHLORAMINS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
CHLORATES	<0,1	1,2	1,3	1,3	1,3
CHLORITE (µg/l)	<50	<50	<50	<50	<50
PERCHLORATES	7	9,8	6,3	16	5,7



When looking at the tables and graphs, it can be concluded that, as far as by-products generated are concerned, the optimum is to achieve a high treatment flow and a short oxidation time; in this way, the increase in by-product concentration due to electroporation and oxidation is minimal.

Disinfection effect of electroporation as a function of flow rate

This table shows the concentration measurements of the microorganisms to be eliminated at the entrance and exit of the reactors for flows of 5, 10, 15 and 20 m³/h respectively.

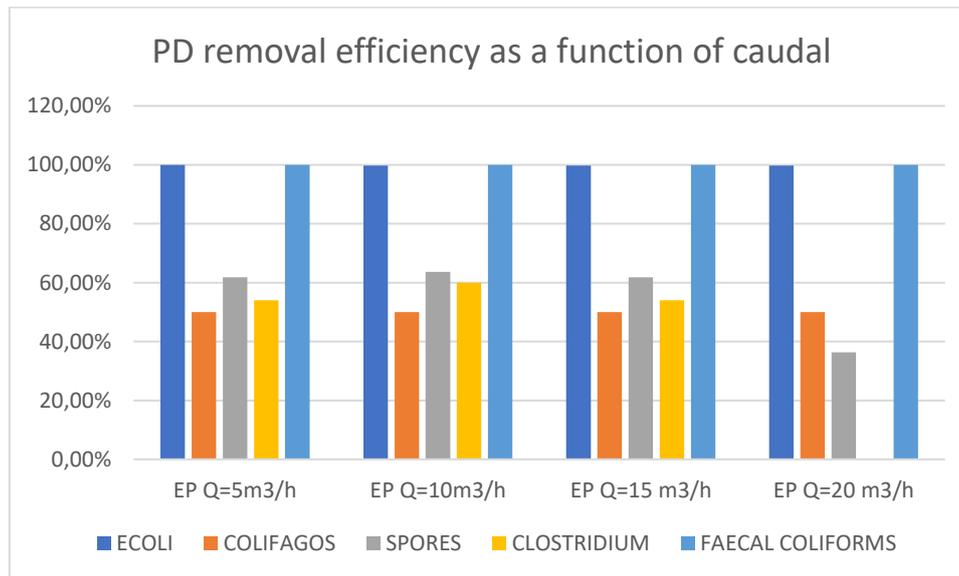
	ENTRY	EP Q=5 m ³ /h	EP Q=10 m ³ /h	EP Q=15 m ³ /h	EP Q=20 m ³ /h
E COLI	18000	15	42	49	54
COLIFAGOS	2	<1	1	<1	<1
SPORES	1100	420	400	420	700
CLOSTRIDIUM	1000	460	400	460	1000
FAECAL COLIFORMS	100000	1	2	2	12

With these measures, the disinfection performance of the electroporation process has been calculated for these microorganisms, obtaining the following results:

	EP DISINFECTION REDUCTION			
	EP Q=5 m ³ /h	EP Q=10 m ³ /h	EP Q=15 m ³ /h	EP Q=20 m ³ /h
E COLI	99,92%	99,77%	99,73%	99,70%



COLIFAGOS	>50%	50,00%	>50%	>50%
SPORES	61,82%	63,64%	61,82%	36,36%
CLOSTRIDIUM	54,00%	60,00%	54,00%	0,00%
FAECAL COLIFORMS	99,999%	99,998%	99,998%	99,988%



The effectiveness of eliminating *Escherichia coli* and faecal coliforms is extraordinary, regardless of the treatment flow. The efficiency of elimination of coliforms is around 50% regardless of the treatment flow rate; this efficiency seems low a priori, but seeing that the inlet concentration is only 2 units/100 ml, this efficiency can be considered sufficient. Finally, as regards the disinfection of spores and clostridium, the yields for the lowest flows (5.10 and 15 m³/h) are around 60%, while for the flow of 20 m³/h the reduction of spores drops to 36% and that of clostridium is nil. Looking at the concentration at the entrance of these organisms, the disinfection efficiency obtained from the tests carried out does not seem to be sufficient.

Disinfection effect of electroporation as a function of flow rate and oxidation time

As previously mentioned, when observing the results of these first trials, the disinfection efficacy of the method for spores and clostridium is not as desired. As a result, it has been decided to repeat the same process for flows of 15 and 20 m³/h, but this time leaving a time for the chlorine generated in the electroporation process itself to exercise its disinfection power, thus acting on oxidation in addition to electroporation. These new measures have been taken leaving a retention time between measurements of 20 minutes, starting from zero time until reaching one hour.

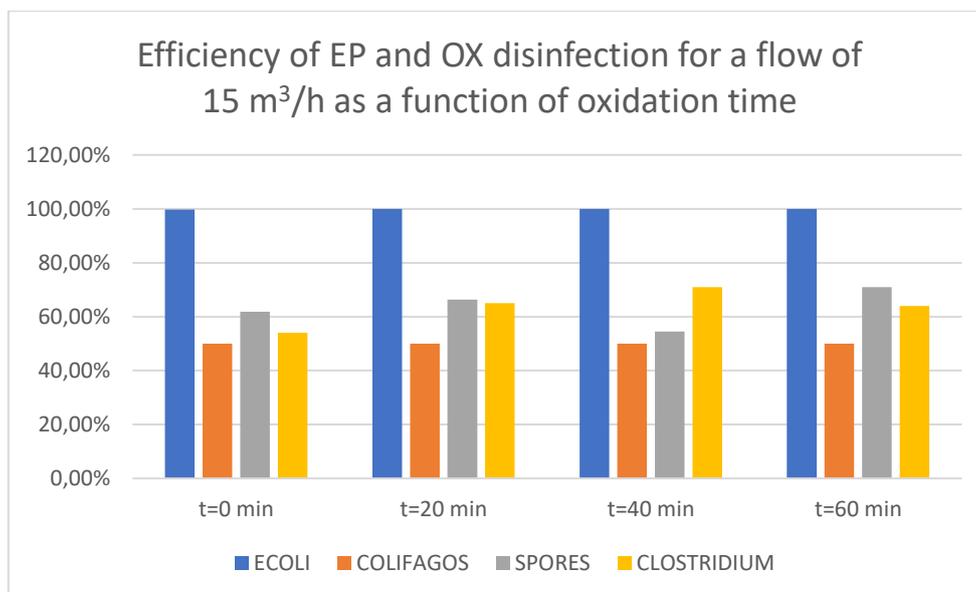


	ENTRY	EP Q=15m ³ /h t=0min	EP Q=15m ³ /h t=20min	EP Q=15m ³ /h t=40min	EP Q=15m ³ /h t=60min
E COLI	18000	49	2	3	<1
COLIFAGOS	2	<1	<1	<1	<1
SPORES	1100	420	370	500	320
CLOSTRIDIUM	1000	460	350	290	360

	ENTRY	EP Q=20m ³ /h t=0 min	EP Q=20m ³ /h t=20min	EP Q=20m ³ /h t=40min	EP Q=20m ³ /h t=60min
E COLI	18000	54	<1	<1	<1
COLIFAGOS	2	<1	<1	<1	<1
SPORES	1100	700	410	190	480
CLOSTRIDIUM	1000	1000	220	430	380

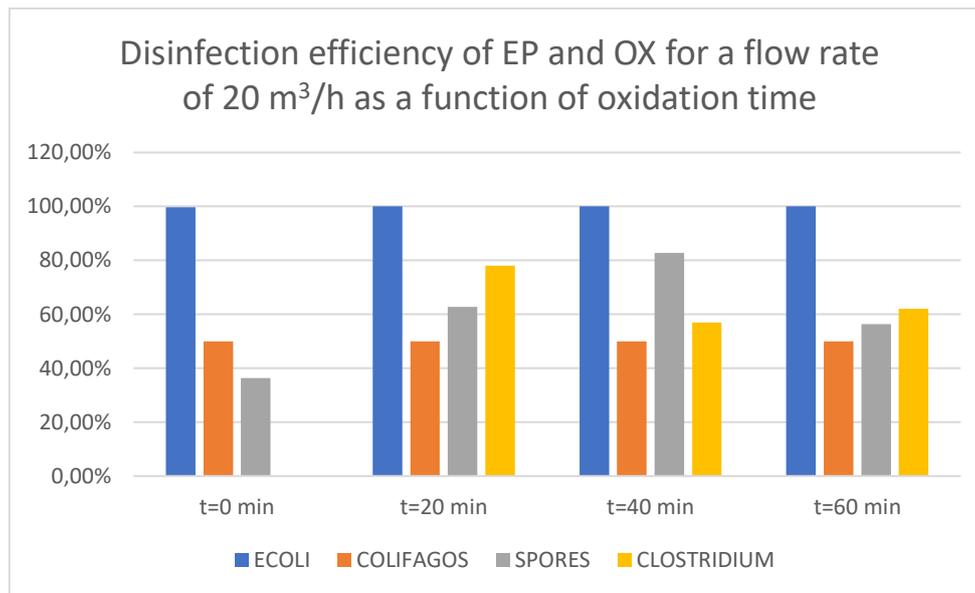
In view of the two tables above, the disinfection yields have been calculated for both flows by allowing the oxidation to act for one hour. The following results have been obtained:

	EP+OX DISINFECTION REDUCTION (Q=15 m ³ /h)			
	t=0 min	t=20 min	t=40 min	t=60 min
E COLI	99,73%	100,00%	100,00%	100,00%
COLIFAGOS	>50%	>50%	>50%	>50%
SPORES	61,82%	66,36%	54,55%	70,91%
CLOSTRIDIUM	54,00%	65,00%	71,00%	64,00%





	EP+OX DISINFECTION REDUCTION (Q=20 m ³ /h)			
	t=0 min	t=20 min	t=40 min	t=60 min
E COLI	99,70%	100,00%	100,00%	100,00%
COLIFAGOS	>50%	>50%	>50%	>50%
SPORES	36,36%	62,73%	82,73%	56,36%
CLOSTRIDIUM	0,00%	78,00%	57,00%	62,00%



Again, observing the disinfection performance: the removal efficiency of *Escherichia coli* for both flows (15 and 20 m³/h) becomes 100% regardless of the oxidation time left after electroporation. On the other hand, the disinfection of coliphages remains at the previous values: its value does not increase despite the oxidation time left. Finally, by leaving oxidation time, better disinfection yields of spores and clostridium are achieved, with the optimum flow rate being 20 m³/h; and the optimum time of 20 minutes to eliminate clostridium (reaching 78%) and 40 minutes to eliminate spores (being able to eliminate 83%). So, what we would be most interested in in terms of elimination of microorganisms is to have a high treatment flow and an average oxidation time, between 20 and 40 minutes.

- **Study of the application efficiency of pulsed fields**

Following the excellent disinfection results obtained in the previous tests, a study will be carried out on the effectiveness of the method in terms of eliminating *Escherichia coli* bacteria and total coliforms when the electrical field applied is not continuous but pulsed at intervals. In addition, the amount of free chlorine remaining in the water after



electroporation treatment with these pulsed fields will be studied. These tests will be carried out for flows of 10 and 15 m³/h.

After carrying out these tests, as in all cases, each one with its operating conditions, the percentage of disinfection is adequate in all cases, being between 99 and 100% disinfection in all cases. At the same time, the longer the field is active, the more free chlorine concentration is measured; this is logical, since the longer the electroporation is active, the higher the degree of disinfection takes place, and by adding the same chlorine you have more free chlorine (not combined), since it has nothing to react with. So, the longer the electroporation is active, the less chlorine is needed to ensure disinfection. It is also interesting to observe the slope of the lines that are formed and see which one has a greater slope, which in the long run will indicate that its concentration of free chlorine may be lower as the pulse time decreases.

For the 10 m³/h flow test and 100 ms cycle time, the optimum working conditions are a current of 100 A and a current density of 303.03 A/m², which gives a free chlorine of 0.22 mg/l. Looking at it from the perspective of achieving greater slope, the test with working conditions of current 83 A and current density 251 A/m² will be the one with the best capacity to decrease its free chlorine concentration as the active field becomes smaller.

For the 10 m³/h flow test and 200 ms cycle time, the optimum working conditions are a current of 66 A and a current density of 200 A/m², which gives a free chlorine of 0.16 mg/l. For these conditions also the highest slope is obtained, so this test will be the one with the highest capacity to decrease its free chlorine concentration.

For the 10 m³/h flow test and 300 ms cycle time, the optimum working conditions are a current of 66 A and a current density of 200 A/m², which gives a free chlorine of 0.28 mg/l. For these conditions also the highest slope is obtained, so this test will be the one with the highest capacity to decrease its free chlorine concentration.

In the case of a flow rate of 15 m³/h and cycle time of 100 ms, seeing that the disinfection percentage is adequate whatever the active time, the optimum working point should be the one with the least active field time, as it should be the one with the lowest concentration of free chlorine. However, it is observed that this is not the case, this may be due to some error when measuring the free chlorine concentrations.



For the 15 m³/h flow test and 200 ms cycle time, the optimum working conditions are a current of 83 A and a current density of 251 A/m², which gives a free chlorine of 0.2 mg/l. For these conditions also the highest slope is obtained, so this test will be the one with the highest capacity to decrease its free chlorine concentration.

- **Legionella reduction study**

For this last test, for a flow rate of 15 m³/h, a study was carried out on the effectiveness of the method in terms of eliminating Legionella. For this purpose, the concentration of Legionella has been measured at the entrance and exit of the cells immediately after the electroporation process and after one hour of waiting, once the chlorine naturally generated in the electroporation has already exercised its oxidation capacity.

Entry	EP output (T= 0 h)	EP+OX output (T=1 h)
27600	62400	31
5400	6300	68
0	8500	37
22000	50400	0
1780	8900	0
67857	90000	0
54358	80328	469

The following table clearly shows how the concentration of Legionella increases after the water passes through the cells and undergoes electroporation. These results may seem strange at first sight, as it may not be understood how the concentration of this bacterium increases if the water is being subjected to a disinfection process. The explanation is that a large part of this bacterium is found inside spores whose membrane is destroyed in the electroporation process, and it is then that the Legionella is released from the spore and causes this increase in concentration.

Increased Legionella concentration between input and output
126,09%
16,67%
-
129,09%



400,00%
32,63%
47,78%

Below is a table showing the disinfection efficiency of the electroporation and oxidation processes with respect to the output of the equipment (once the spores have been destroyed by the effect of electroporation).

EP+OX disinfection reduction with respect to output (T=0 h)
99,95%
98,92%
99,56%
100,00%
100,00%
100,00%
99,42%

Looking at the results, it can be said that the disinfection performance is adequate. In all cases the Legionella elimination performance is above or close to 99% disinfection.

Conclusions

As regards the study of the disinfection efficiency of the isolated electroporation method and the electroporation method combined with the oxidation process for the elimination of certain micro-organisms harmful to human health while trying to avoid the excessive formation of unwanted by-products, it has been concluded that in order to avoid the formation of unwanted by-products, most of them from chlorine, the optimum treatment for almost all cases is to carry out disinfection with high water flows (20 m³/h in our case) without leaving any oxidation time after electroporation, since in many cases by leaving this time for oxidation to take place, the amount of by-products present in the water to be treated increases. On the other hand, with regard to the desire to eliminate certain microorganisms that are harmful to humans, it has been observed that the best method of disinfection is to treat high flows of water (for us 20 m³/h) and leave an average oxidation time, between 20 and 40 minutes depending on the microorganism that is to be eliminated most effectively. So, to achieve a balance between high disinfection power



without generating an excess of by-products, we conclude that the optimal treatment conditions are to work with high flows and low oxidation times (around 20 minutes).

Compiling the conclusions drawn from the study of the concentration of free chlorine and the disinfection efficiency of the equipment as a function of the flow rate and passage time, cycle duration, working current and current density, it can be seen that the percentage of disinfection is adequate in all the tests, with between 99 and 100% disinfection in all of them. At the same time, the longer the field is active, the more free chlorine concentration is measured; this is logical, since the longer the electroporation is active, the higher the degree of disinfection takes place, and by adding the same chlorine you get more free (unmixed) chlorine, since it has nothing to react with. So, the longer the electroporation is active, the less chlorine is needed to ensure disinfection, and this is better because you get water with less smell and taste, less toxicity and less use of chemical reagents. So we conclude that, for each flow rate and duration of the cycle of the tests, seeing that the percentage of disinfection is adequate whatever the active time, the point of optimal conditions of working current and current density will be the one that leaves less free chlorine in the water, which coincides with the one with the shortest active field time.

Finally, in relation to the study on the performance of elimination of Legionella, the previously mentioned is observed, and it is that, when the water is submitted to the isolated electroporation process, the concentration of Legionella grows abruptly due to the breakage of the membranes of certain spores that contain the bacterium, with which this bacterium is released to the residual water. In spite of this, when a time of one hour is left for the chlorine naturally generated during electroporation to exercise its oxidation potential, an extraordinary reduction in the concentration of this bacterium in the water is observed, in almost all cases verging on 100% disinfection, either by comparing the output after electroporation and oxidation with the input to the reactors or with the output after electroporation only.



GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis de eficiencia de métodos de electroporación y
cloración para desinfección de efluentes residuales.

Autor: Camilo Pereira Alonso

Director: Carlos Morales Polo

Co-Director: Luis Botija Ibáñez

Madrid

Julio de 2020



Tabla de contenido

1. Palabras clave-abreviaturas.....	34
2. Introducción	34
3. Objetivos.....	37
4. Antecedentes.....	38
5. Fundamentación teórica	41
5.1. Descripción del equipo.....	45
6. Metodología	51
7. Resultados y discusión.....	54
7.1. Estudio general del método de electroporación	54
7.1.1. Estudio de subproductos afectados por la electroporación en función del caudal..	55
7.1.2. Estudio de subproductos afectados por la electroporación y el tiempo de oxidación	60
7.1.3. Efecto de desinfección de la electroporación en función del caudal.....	66
7.1.4. Efecto de desinfección de la electroporación en función del caudal y del tiempo de oxidación	71
7.2. Estudio de la eficacia de aplicación de campos pulsados	75
7.2.1. Estudio de rendimiento para caudal de 10 m ³ /h y duración del ciclo de 100 milisegundos	80
7.2.2. Estudio de rendimiento para caudal de 10 m ³ /h y duración del ciclo de 200 milisegundos	85
7.2.3. Estudio de rendimiento para caudal de 10 m ³ /h y duración del ciclo de 300 milisegundos	89
7.2.4. Estudio de rendimiento para caudal de 15 m ³ /h y duración del ciclo de 100 milisegundos	94
7.2.5. Estudio de rendimiento para caudal de 15 m ³ /h y duración del ciclo de 200 milisegundos	95
7.3. Estudio de reducción de la Legionella.....	99
8. Conclusiones.....	103
8.1. Conclusión estudio general del método de electroporación.....	103
8.2. Conclusión estudio de aplicación de campos pulsados	103
8.3. Conclusión estudio de reducción de la Legionella	104
9. Referencias bibliográficas.....	104
10. Anexo.....	105
10.1. Relación con objetivos de desarrollo sostenible.....	105



1. Palabras clave-abreviaturas

EDAR: Estación depuradora de aguas residuales

UV: Ultravioleta

PLC: Dispositivo para el control del proceso

HMI: Interfaz humana

ODS: Objetivo de desarrollo sostenible

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

2. Introducción

Tras unas prácticas durante el verano de 2019 en Geodesic Innovations se me planteó la posibilidad de realizar el proyecto de fin de grado con el objeto de estudiar la posibilidad de usar los equipos de desinfección de agua de Geodesic para el tratamiento de aguas destinadas a usos agronómicos e industriales y ver su rendimiento frente a los métodos tradicionales.

Geodesic Innovations es una empresa que ha desarrollado la tecnología más avanzada del mercado para la desinfección y conservación del agua. Sus equipos, cuyo funcionamiento explicaremos detalladamente más adelante, son capaces de ejecutar de forma autónoma su mantenimiento preventivo, y poseen un diseño completamente modular que les permite abarcar todo tipo de caudales de agua.

En los equipos se lleva a cabo un proceso de electroporación y un proceso de oxidación avanzada. La electroporación es un mecanismo electrofísico que tiene como objetivo principal la eliminación de bacterias; los campos eléctricos generados en el equipo provocan el desequilibrio electrosmótico de la membrana celular bacteriana, provocando su ruptura y la muerte de las bacterias. Por otro lado, la aplicación de estos campos eléctricos provoca las reacciones de oxidación natural. Se producen dos tipos de reacciones de oxidación: oxidaciones directas de materia orgánica o inorgánica, con este método, los propios equipos son capaces de generar cloro activo a partir de los cloruros presentes en el agua, por ejemplo; y reacciones de generación de oxidantes, el



equipo genera radicales hidroxilos a partir de las propias moléculas de agua. Todos los equipos están conectados a una plataforma de gestión remota CB-OPCON, también diseñada por Geodesic, que permite la automatización del mantenimiento y minimiza los requisitos de operación, logística y mantenimiento. Más adelante se explicarán a fondo estos procesos de electroporación y oxidación avanzada.

Gracias al uso de esta innovadora técnica Geodesic, independientemente de su campo de aplicación (piscinas y spas, torres de refrigeración, y redes de agua y distribución), observa tres ventajas principales frente a los sistemas tradicionales: eliminan totalmente los productos químicos presentes en el agua; flexibilizan la estrategia de tratamiento del agua y su registro, controlando y monitorizando la instalación desde cualquier lugar gracias al CB-OPCON; y ahorran hasta el 90% del agua. Más adelante veremos las ventajas concretas del método según su uso en piscinas y spas, torres de refrigeración o redes de distribución de agua. Por el contrario, los sistemas tradicionales aplicados a circuitos semicerrados o a líneas de transporte de agua regenerada conllevan la necesidad de adición de un oxidante (generalmente cloro), que produce una alteración de las características fisicoquímicas del agua y por lo tanto conllevan una corrección mediante dosificación de otros agentes químicos, dañinos tanto para las personas como para las instalaciones y el medioambiente. Otra gran desventaja de los sistemas tradicionales es la necesidad de renovación del agua debido a los cambios en las propiedades del agua causados por la acción de los productos químicos, lo que conlleva una alta tasa de desperdicio traducida en costes económicos y efectos medioambientales.

Además de estas tienen una serie de ventajas adicionales: no generan subproductos; no hay necesidad de tiempo de contacto; el proceso no depende ni de la transmitancia, ni del pH, ni de la conductividad; y la facilidad de poder integrar este mecanismo con otros procesos.

Actualmente los equipos están trabajando en piscinas y spas, torres de refrigeración, y en redes de agua regenerada. Entre otras posibles aplicaciones que se están estudiando para su implementación en un futuro cercano encontramos la regeneración de agua en trenes de pasteurización, la reutilización de agua en procesos industriales, la



regeneración de agua en cadenas de lavado de envases, ... Este trabajo de investigación va a estar centrado principalmente en el campo de tratamiento de agua residuales; en concreto para ver la eficacia de la desinfección de agua residual para su posterior vertido al medio edáfico.

En cuanto al tratamiento convencional del agua en piscinas y spas, el agua de estos es una solución concentrada de agentes químicos, debido a su dosificación necesaria para cumplir unos requisitos mínimos de limpieza, provocando en muchas ocasiones irritaciones o alergias tanto en la piel como en los ojos. El equipo desarrollado por Geodesic evita estos inconvenientes al prescindir, como ya hemos comentado, en un 100% de la utilización de productos químicos; y se regula automáticamente en función del potencial de oxidación-reducción del agua, pudiendo elegir en cada comento que técnica usar en cada momento. En el caso de instalación en piscinas y spas, el equipo se instala junto al filtro (que se encarga de eliminar sólidos en suspensión, sales y patógenos) pudiendo instalarlo de manera previa o posterior al filtro, según la relación volumen-uso de la piscina o el spa. Las principales ventajas de esta tecnología afectan, en este caso, a la calidad del agua (eliminación de la grasa en la línea de flotación, reducción del 50-70% de la turbidez, no alteración de la conductividad ni del pH); al ahorro (ahorro del 100% del coste de productos químicos, eliminación de riesgos laborales asociados a la manipulación, gestión y almacenamiento de estos, ahorro de hasta el 80% de la renovación del agua debido a la reducción de la frecuencia de limpieza del filtro, ahorro de la energía para calentar el agua no renovada); y a la seguridad (una mayor seguridad sanitaria y sostenibilidad para con el medio ambiente).

El tratamiento para torres de refrigeración y condensadores evaporativos consiste de nuevo en una combinación de la técnica de electroporación y oxidación avanzada con un proceso de filtración que elimina los fangos y los sólidos en suspensión que se transfieren de los grandes caudales de aire que circulan por las torres de refrigeración y por los condensadores evaporativos al agua del interior de estos. En estos casos el uso del equipo de Geodesic es ventajoso en cuanto a sostenibilidad (evita la producción, el almacenamiento y el vertido de productos químicos); y a ahorro (ahorra hasta el 90% de agua, en sustancias químicas y en número de intervenciones de personal de



mantenimiento). Con estas ventajas esta tecnología permite obtener el máximo rendimiento posible a torres de refrigeración y a condensadores, tanto al sistema en sí como a su plantilla de mantenimiento.

En cuanto al tratamiento del agua para su posterior reutilización con garantías. Esta reutilización debe realizarse siempre bajo condiciones de máxima seguridad, esto implica que el agua debe cumplir unos requisitos de desinfección en el momento de su reutilización, no solo en el punto donde se depura el agua. Los principales consumidores de agua regenerada son la agricultura, la industria, parques y jardines, y campos de golf. Existen numerosos riesgos de reinfeksi3n durante la distribuci3n de agua hasta estos destinos, entre los que destacamos el tiempo que pasa desde la desinfecci3n hasta el uso del agua, el estado de las tuberías de la red de suministro y el almacenamiento del agua en canales y/o dep3sitos. Normalmente, para contrarrestar este peligro de reinfeksi3n se recurre a la dosificaci3n de cloro, que a su vez implica los siguientes problemas: dificultad para encontrar la concentraci3n justa que garantice la calidad en los puntos m3s desfavorables sin excederse en los m3s favorables; importantes sobrecostes logísticos y de gesti3n por la necesidad de realizar rechloraciones intermedias para intentar eliminar los riesgos de sobrechloraci3n o infrachloraci3n (adem3s de no conseguir eliminarlos por completo); y generaci3n de subproductos químicos perjudiciales para la salud. Con el método desarrollado por Geodesic se consigue: evitar el uso de cloro y las rechloraciones, eliminando las consecuencias negativas de este y los inconvenientes logísticos y de manejo del cloro; flexibilizar la estrategia pudiendo hacer un tratamiento “en alta” o m3s cercano a los puntos de entrega gracias a su rentabilidad económica; y sectorizar la red de distribuci3n, adaptándose así a las necesidades concretas de un sector o un cliente.

3. Objetivos

La desinfecci3n de agua residual para su posterior vertido al medio edáfico está sujeta a una estricta normativa de ámbito nacional. Esta normativa exige un alto grado de desinfecci3n en relaci3n a diversos microorganismos con el objetivo de garantizar las



condiciones sanitarias del agua en relación a los efectos que tiene sobre la salud pública y sobre el medio ambiente.

A continuación, se van a enumerar los principales objetivos de este trabajo:

Como principal objetivo: comprobar la eficiencia de la electroporación y la cloración para la desinfección de efluentes residuales para su posterior vertido al medio edáfico.

Paralelamente, se van a proponer posibles mejoras para este método, como la posibilidad de la aplicación de campos pulsados.

Por último, se va a llevar a cabo un estudio de desinfección del método de la Legionella, bacteria que causa una enfermedad respiratoria llamada legionelosis.

4. Antecedentes

La desinfección se refiere a la destrucción o inactivación selectiva de los organismos nocivos o las propiedades que causan enfermedades o infecciones. La desinfección es el tratamiento de mayor transcendencia en los procesos de potabilización y depuración (en caso de posterior reutilización del agua). En países subdesarrollados el agua contaminada es causa de millones de víctimas al año, con una tasa de mortalidad muy elevada.

Aunque hay que recalcar la diferencia entre desinfección y esterilización. En la desinfección no se consiguen eliminar todos los organismos, mientras que un proceso de esterilización conlleva la destrucción de todos ellos.

En el campo de estudio, los organismos con mayores índices en la producción de enfermedades se clasifican en tres categorías: bacterias, virus y quistes amebianos.

Entre los grupos bacterianos presentes en el agua, asociados a enfermedades en humanos muy comunes y extendidas, se encuentran las bacterias coliformes, los Streptococcus spp. o la Legionella spp. Las enfermedades bacterianas más típicas transmitidas por el agua son: la fiebre tifoidea, el cólera, el paratífus y la disentería bacilar; y de las causadas por virus encontramos, entre otras, la poliomielitis y la hepatitis infecciosa.



Existen numerosas técnicas para la desinfección del agua que, aunque son eficaces en muchos aspectos, presentan algunos inconvenientes. En línea con las necesidades de eficiencia biocida, facilidad y comodidad operacional, y sostenibilidad económica y medioambiental; y como consecuencia de estos inconvenientes de los métodos convencionales se ha propiciado la búsqueda de nuevas soluciones para una eficiente desinfección.

A continuación, se expone de forma general una sinopsis de los mecanismos de desinfección tradicionales más conocidos junto con sus limitaciones e inconvenientes. No hay que olvidarse que en muchos casos el método de desinfección completo y más adecuado consiste en la combinación de varios de estos mecanismos.

Filtración: método físico que consiste en pasar el agua a través de un medio poroso que retiene partículas en suspensión (coloides) y microorganismos ($> 5 \mu\text{m}$). Los filtros se clasifican en filtros lentos y rápidos. Los filtros lentos eliminan hasta un 98% de patógenos, sólidos en suspensión y sales; pero requieren tiempos de maduración del filtro y filtrado del agua de hasta 6 meses, por lo que no serán objeto de estudio en este trabajo. Los filtros rápidos tienen mayor velocidad de filtración, pero solo retiran hasta el 65% de patógenos, sólidos en suspensión y sales. Existen varios tipos de filtros rápidos: por gravedad, de presión, de flujo ascendente y de medios múltiples, entre los que se encuentran los de medio simple (arena/cristal o antracita), medio dual (arena/cristal + antracita) y multimedio (granate + arena/cristal + antracita). El problema de este método es el alto coste de mantenimiento de los filtros, que además si no se mantienen correctamente pueden convertirse en una nueva fuente de infección. Por descontado está el hecho de que es necesario su combinación con otros procesos para la completa desinfección del agua.

Desinfección por adición de reactivo químico: el cloro y sus derivados son los agentes desinfectantes más empleados, entre ellos se encuentra el cloro gas (Cl_2), el hipoclorito de sodio (NaClO), el hipoclorito de calcio (CaClO), el dióxido de cloro (ClO_2) y las cloraminas. Todos ellos producen ácido hipocloroso (HClO) como agente desinfectante. El cloro modifica y destruye la membrana plasmática y el ADN de los organismos, causando daños irreversibles impidiendo así su reproducción.



El cloro es muy eficaz, pero es tóxico para los humanos. Su mayor inconveniente en la desinfección de aguas residuales es la generación de subproductos peligrosos tanto para el hombre como para el medioambiente, como hierro, manganeso o compuestos organoclorados (Trihalometanos: cloroformo, tricloro metano, dicloro, ...). Una posible solución para la eliminación de los Trihalometanos es el uso de filtros de carbón activo.

Desinfección con ozono – ozonización: es un método que resulta interesante debido a sus ventajas sobre otras opciones. El ozono tiene una alta tasa de desinfección, siendo más eficiente que el cloro; y además debido a su acción directa sobre la membrana plasmática se reduce considerablemente el tiempo de contacto. El ozono también mejora la calidad del agua tratada en cuanto a que reacciona con todo tiempo de sustancias presentes en ella, ya sean de carácter orgánico o inorgánico, además de que, por lo general, no genera productos derivados no deseados. Aun así el ozono presenta una serie de desventajas: implica un alto consumo de energía (costes económicos); es un gas muy volátil (breve periodo de semidesintegración), por lo que suele ser necesaria su producción *in situ*; en presencia de algunos compuestos (aldehídos, bromo, cetonas, ...) forma compuestos tóxicos perjudiciales para la salud; y la mayor de todas, que no tiene efecto residual, por lo que es necesaria su combinación con otros métodos si se precisa de un residuo de desinfectante para posterior transporte del agua.

Desinfección por radiación ultravioleta: en este proceso se irradia el agua con luz ultravioleta de onda corta (254 nm) procedentes de lámparas UV que resulta letal para virus y bacterias, descomponiendo fotoquímicamente la estructura celular. Su efectividad es menor que la del cloro y el ozono, pero tiene una clara ventaja frente a estos dos métodos, y es que no genera subproductos. La desinfección por radiación UV no deja un residual de desinfectante en el agua, necesario para su posterior distribución por la red de tuberías; no suele ser práctica a la hora de instalar lámparas UV para grandes volúmenes de agua debido a su alto coste de inversión inicial y de mantenimiento (recambios); y además requiere de altos valores de transmitancia del agua para ser efectiva.



De esta sinopsis de los métodos de desinfección de agua convencionales, se concluye que hasta ahora no se ha desarrollado ningún método que cumpla de forma efectiva con los siguientes requisitos expuestos:

- Eficacia de desinfección independientemente de las características fisicoquímicas del agua tratada según su procedencia.
- Ausencia de efectos dañinos para el ser humano o para el medioambiente.
- No necesidad de aplicación de productos para garantizar la calidad del agua tras el paso por las redes de distribución.
- Coste energético y económico aceptables.
- No necesidad de aplicación de métodos complementarios para lograr la total desinfección del agua.

En el siguiente punto se recoge una explicación teórica más desarrollada sobre el método de Geodesic, así como la monitorización de los datos obtenidos y la descripción del equipo, del cual más adelante estudiaremos si cumple o no con los requisitos para su uso en el tratamiento de aguas residuales con el fin de posibilitar su vertido al medio edáfico, cumpliendo siempre con los requisitos que impone la normativa española.

5. Fundamentación teórica

Como se mencionó al principio del trabajo el método desarrollado consiste en una combinación de técnicas electrofísicas (electroporación) y electroquímicas (oxidación avanzada). Ambas se producen por el efecto que provoca la aplicación de energía, en forma de diferencia de potencial, en el interior de una celda electrolítica (*Ilustración 1*) formada por una batería de electrodos.

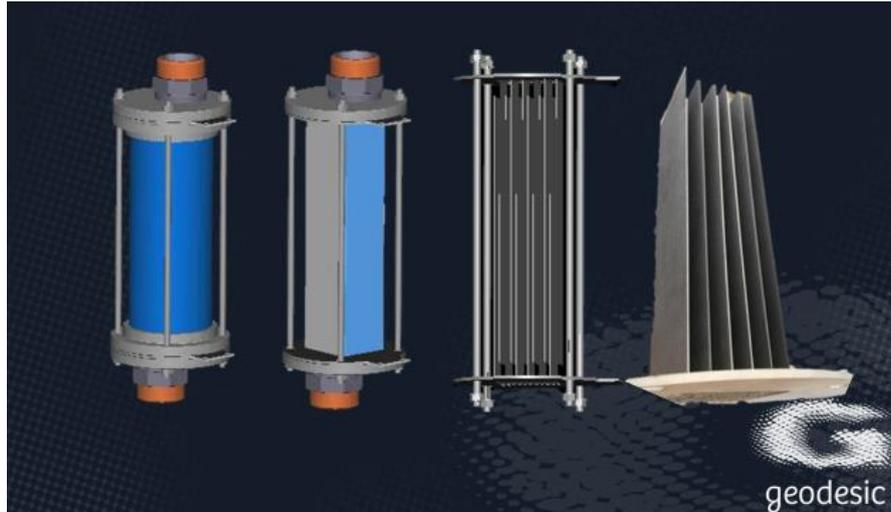


Ilustración 1: Celda electrolítica proporcionada por Geodesic Innovations

A continuación, se incluye un breve esquema técnico del proceso de desinfección:



Ilustración 2: Mapa técnico de la desinfección electroquímica proporcionado por Geodesic Innovations.

Mecanismo electrofísico: Electroporación

La electroporación es un proceso que se consigue por la aplicación de una corriente eléctrica que, a su paso por el electrolito (el agua sucia) yendo del ánodo al cátodo, induce un potencial eléctrico que conlleva un cambio de la diferencia de potencial entre el interior y el exterior de la membrana celular (potencial transmembrana). Esta diferencia de potencial produce la alteración del equilibrio electrosmótico de la



bacteria (*Ilustración 3*) con lo que se consigue la apertura de uno o más poros en la membrana provocando la muerte irreversible de la bacteria o microorganismo (*Ilustración 4*). La inutilización de los mecanismos celulares para mantener el equilibrio osmótico de sus membranas provoca la entrada incontrolada de agua al interior de los microorganismos, que de manera sostenida en el tiempo provoca la muerte de estos.

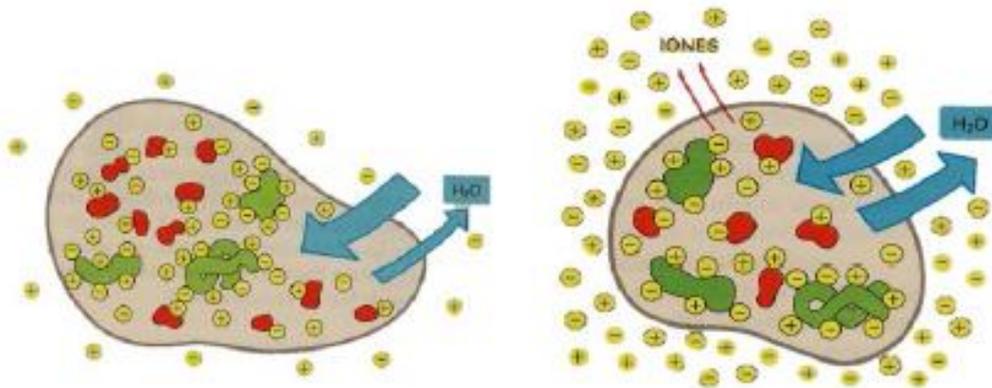


Ilustración 3: Potencial transmembrana permite a una célula mantener el equilibrio electroosmótico.

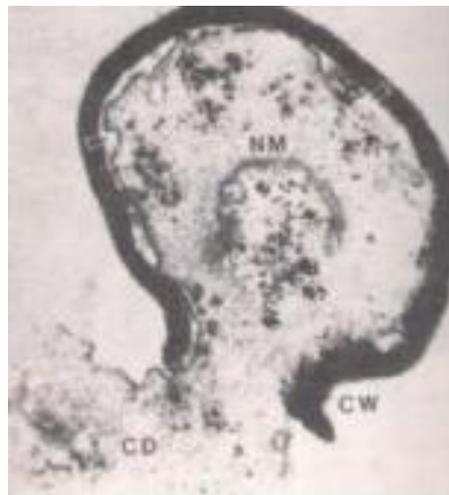


Ilustración 4: Rotura de la membrana plasmática de una célula electroporada.

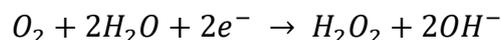
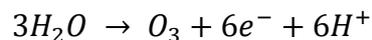
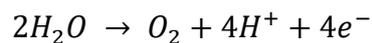
Además, la acción del campo eléctrico aplicado al electrolito termina provocando la desnaturalización bacteriana con lo que se ve multiplicado el fenómeno de la electroporación permanente (irreversible).



Mecanismos electroquímicos: electro-oxidación avanzada y generación de oxidantes

A partir de la electrólisis del agua causada por los mecanismos electrofísicos, se generan compuestos muy oxidantes (radicales hidroxilos) en la superficie del ánodo (polo positivo) que dan lugar a la oxidación de la materia orgánica. La eliminación de la materia orgánica gracias a la oxidación, además de ser útil en sí misma ya que elimina suciedad del agua, es una manera de dejar a los microorganismos más vulnerables frente a la acción de los mecanismos electrofísicos, ya que muchos de ellos se “refugian” en estas capas de materia orgánica presentes en el agua.

Según las siguientes reacciones que se producen en el ánodo, se da una generación de oxidantes de manera natural entre los que están: oxígeno, ozono, cloro libre y agua oxigenada.



Los tres procesos descritos se dan en el interior de la celda en función de niveles energéticos, siendo el que menos energía requiere la generación de oxidantes, seguido de la oxidación avanzada de materia orgánica y por último la electroporación, siendo este el de mayor requerimiento energético. Según el potencial eléctrico suministrado a la celda electrolítica tendrá lugar únicamente la generación de oxidantes, esta combinada con la oxidación de materia orgánica o ambas combinadas con la electroporación. La gestión de equipo mediante el software desarrollado (CB-OPCON) asegura que en cada momento tengan lugar la técnica o las técnicas necesarias para mantener la calidad del agua que se desea en función de cada aplicación o uso.

La actividad desinfectante de la electroporación y la oxidación avanzada remite su acción al interior de las celdas, mientras que la generación de oxidantes, en concreto y principalmente el cloro libre, asegura la profilaxis en el tiempo y el espacio. Con esto se



consigue generar la cantidad de residual de cloro necesaria para asegurar la calidad del agua en los puntos de entrega tras su viaje (tiempo y espacio), ya sea por las redes de distribución de agua o por circuitos cerrados o semicerrados (piscinas, spas, torres de refrigeración, etc.).

Para poder gestionar de manera eficiente la combinación de estas técnicas, se usa el potencial de oxidación-reducción (potencial redox) como valor de referencia. El potencial redox es la proporción que resulta de la contraposición de una determinada concentración de oxidantes (por ejemplo, el cloro libre generado en la oxidación) a una determinada concentración de reductores (bacterias, materia orgánica, etc.), por lo que, si se trata de la forma adecuada, se convierte en un parámetro objetivo que indica el estado higiénico del agua de forma precisa.

De este modo, un aumento del valor del potencial redox indica un incremento de los oxidantes frente a los reductores o una disminución de los reductores respecto a los oxidantes, con lo que el agua no necesitará tanto tratamiento y se podrá reducir un poco la corriente eléctrica aplicada. De manera análoga y en sentido contrario, una disminución del potencial redox se deberá al aumento de los reductores respecto a los oxidantes o a la disminución de los oxidantes en relación a los reductores, por lo que el agua a tratar precisará una acción más intensiva de estas técnicas y se deberá aumentar la corriente eléctrica aplicada.

5.1. Descripción del equipo

Para entender mejor el funcionamiento del método y complementar la fundamentación teórica, a continuación, se propone una explicación del equipo desarrollado por Geodesic (*Ilustración 5*) y del circuito que el agua realiza por su interior. La *Ilustración 6* representa una vista interna de la celda donde se llevan a cabo los procesos de electroporación y oxidación avanzada.



Ilustración 5: Equipo de 4 reactores/celdas proporcionado por Geodesic Innovations.

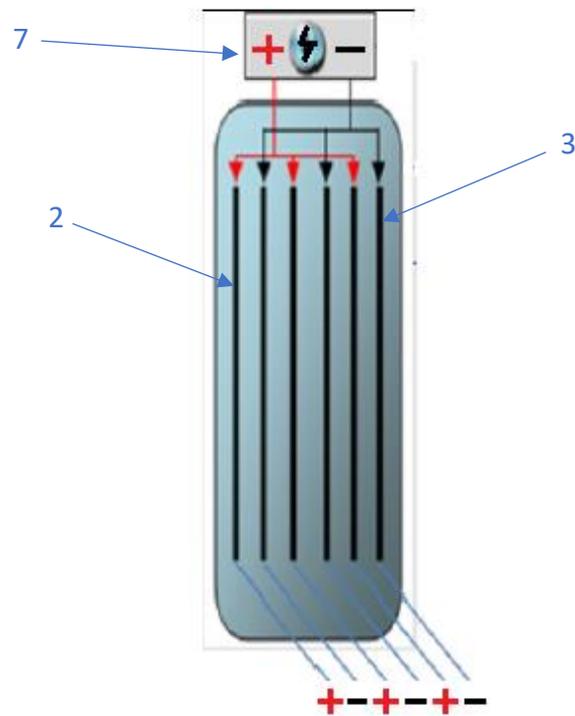


Ilustración 6: Vista interna del reactor proporcionada por Geodesic Innovations.



A continuación, se incluye una lista con las partes que se señalan en las ilustraciones:

- Marca 1: Celda electrolítica o reactor.
- Marca 2: Ánodo del reactor.
- Marca 3: Cátodo del reactor.
- Marca 4: Válvula de entrada de agua a las celdas.
- Marca 5: Válvula de salida de agua de los reactores.
- Marca 6: Bomba de impulsión de agua hacia el equipo.
- Marca 7: Fuente de corriente continua.
- Marca 8: Cuadro de instrumentos o PLC.
- Marca 9: Depósito de ácido.
- Marca 10: Bomba de impulsión de ácido.
- Marca 11: Válvula de entrada de ácido a los reactores.
- Marca 12: Válvula de salida de ácido de las celdas.

El sistema de la *Ilustración 5* se compone de cuatro reactores formados en su interior por finas láminas de electrodos, organizados de tal manera que constituyen celdas electrolíticas de tipo “filtro de prensa”. En estas celdas se alternan las láminas en forma de ánodos (marca 2) y cátodos (marca 3) según su alimentación, que están compuestos normalmente por diamante dopado con boro o por titanio con recubrimiento, aunque pueden estar fabricados con cualquier material y bajo cualquier proceso de fabricación, siempre y cuando permitan llegar a los potenciales eléctricos requeridos. El agua y las sustancias disueltas presentes en ella constituyen el electrolito.

El circuito que se va a describir a continuación es capaz de hacer circular el agua a través de los reactores, forzando su paso entre los ánodos y los cátodos desde su entrada hasta su salida de las celdas, asegurando un tiempo mínimo de paso del agua entre los electrodos de 0,576 segundos para garantizar la mejor tasa de desinfección. El circuito garantiza la circulación de agua ya sea por efecto de la gravedad o por impulsión mediante una bomba que chupa agua de un depósito y la hace circular a través de equipo.



La fuente de corriente continua es necesaria para asegurar la densidad de corriente eléctrica deseada entre ánodos y cátodos, que generalmente oscila entre valores de 100 y 300 A/m². Esta densidad de corriente depende del material utilizado para fabricar los ánodos y los cátodos, de la geometría de la celda, de la conductividad del agua a tratar y del potencial de electrodo que se va a utilizar. A través de un dispositivo para el control del proceso (cuadro de instrumentos o PLC) se consigue aplicar la tensión necesaria para obtener la densidad de corriente de trabajo consignada en cada instante teniendo en cuenta que la conductividad del agua a tratar puede ser variable con el tiempo y, aun así, es necesario mantener una densidad de corriente constante entre ánodos y cátodos. De este modo, los reactores están conectados a un circuito accionado por la fuente de corriente continua, que a su vez es controlada por el dispositivo para el control del proceso (PLC).

Con las válvulas del circuito de agua abiertas y las válvulas del de ácido cerradas, el agua residual contaminada es bombeada desde un depósito a través de una bomba de impulsión y es dirigida a la entrada de los reactores. Tras su paso por las celdas electrolíticas, el agua, ya desinfectada, emerge de los reactores por la válvula de salida y es devuelta a su origen o a su punto de vertido correspondiente.

Por otro lado, se encuentra el circuito de ácido, que se activa cerrando las válvulas del circuito de agua y abriendo las del circuito de ácido. El equipo incluye un depósito de ácido para limpiar los reactores una vez al día, cuyo tamaño depende del número de reactores del sistema, siendo la capacidad de 50 litros para equipos con un solo reactor; 75 litros para equipos con dos reactores; y 100 litros para instalaciones con tres o cuatro reactores. Las válvulas se abren y se cierran automáticamente controladas por el PLC, y otra bomba más pequeña impulsa el ácido a través de los reactores y de vuelta al depósito al salir de estos. El hecho de que el ácido retorne al mismo depósito una vez limpiadas las celdas hace que sea necesaria su renovación al cabo de un tiempo, ya que el ácido se va degradando con la suciedad que elimina a su paso por los reactores.

El potencial eléctrico debe ser igual o superior a 0,2 V. En caso de aplicación de campos de menor potencial, pero siempre por encima de 0,1 V, se podrá alcanzar el



mismo resultado de desinfección mediante la aplicación de pulsos de mayor duración o intervalos de larga duración.

Como se ha comentado previamente, los electrodos empleados pueden estar fabricados de cualquier material y a través de cualquier proceso de fabricación, siempre que permitan la aplicación de los potenciales necesarios. Entre los más comunes se encuentran:

Electrodos de titanio, rutenio, iridio u otros metales o aleaciones de estos, o aleaciones de esos metales dopados con óxidos metálicos o mezcla de estos óxidos.

Electrodos de materiales cerámicos y electrodos de materiales cerámicos dopados con alguno de los metales recogidos anteriormente.

Electrodos de composición mixta orgánico/metálica u orgánica/cerámica.

Electrodos de diamante y electrodos de diamante dopados con otros metales.

Y, por último, cualquier otro tipo de electrodo capaz de conducir la densidad de corriente eléctrica necesaria y de generar el potencial eléctrico requerido.

Por otro lado, los reactores pueden estar formados tanto por una serie de cátodos y ánodos alternos, como solo por ánodos activables en función de las conexiones que actúan como ánodos cuando están activados y como cátodos cuando no lo están. En este caso, el sistema precisará de un cambio de polaridad que permita la alternancia de activación anódica de los electrodos; o de un sistema de placas bipolares, en las que una cara funciona como cátodo y la otra como ánodo.

Los reactores pueden ser:

Reactores cerrados cuando el agua queda completamente encerrada en su interior, teniendo únicamente un punto de entrada y otro de salida, y circulando el agua en su interior gracias a la presión que aporta una bomba de impulsión o mediante el aprovechamiento de la presión del circuito de agua debida al efecto de la gravedad.



Reactores en canal abierto que tienen una entrada y una salida a diferente cota, pudiendo ser un sistema físicamente abierto, de tal modo que se facilite la circulación de agua a través del reactor por acción de la gravedad sobre la masa de agua.

La corriente eléctrica puede aplicarse a los reactores de manera constante o de forma interrumpida, mediante la aplicación de corrientes pulsadas siguiendo secuencias de activación-desactivación de la corriente, que derivarán en la aparición de campos pulsados.

Los reactores van conectados al PLC por medio de una interfaz humana (HMI) donde se muestran constantemente los parámetros de cada reactor, tanto las consignas deseadas como los parámetros reales instantáneos, como puede verse en la *Ilustración 7*. Desde el HMI se pueden modificar todos los parámetros operacionales de cada reactor, así como realizar un registro local de los datos. Además, el equipo cuenta con un rúter 4G que le da la capacidad de mantener conexión con el servidor central de Geodesic, volcando en el mismo todos los datos de operación y de estado (datos del agua, datos eléctricos, datos mecánicos, ...) con la frecuencia que se desee (por defecto esta frecuencia es de 15 minutos) y que permite generar los correspondientes avisos por fallos o por otras necesidades, de mantenimiento, por ejemplo. La aplicación web desarrollada por Geodesic, CB-OPCON, permite a los usuarios monitorizar y operar en tiempo real los reactores, así como ver ellos mismos las alertas, avisos, informes, datos y gráficas del estado del tratamiento desde cualquier dispositivo con acceso a internet, como se ve en la *Ilustración 8*.



Ilustración 7: Ejemplo de la pantalla principal de un HMI de un reactor proporcionado por Geodesic Innovations.



Ilustración 8: Ejemplo de registro de datos de una piscina de nado de un polideportivo, proporcionada por Geodesic Innovations.

Una vez descrita la naturaleza de la invención y la descripción de los equipos se va a dar pie a analizar los resultados obtenidos y ver si cumplen o no con los objetivos propuestos en este trabajo de investigación.

6. Metodología

Para poder cumplir los objetivos propuestos se han obtenido una serie de datos para llevar a cabo los estudios necesarios; estos datos se han tomado de un agua residual de calidad A3, por lo que antes de atravesar el equipo de Geodesic ha sido previamente



tratada con procesos de desbaste, homogeneización, aireación prolongada con fangos activos, decantación y filtración con filtro de arena. Tras el paso por estas instalaciones el agua residual es conducida a los reactores, donde tiene lugar la desinfección por electroporación y por oxidación.

A continuación, se explica brevemente en qué consisten las fases previas a la electroporación y a la oxidación. El desbaste es la retención mediante rejillas de distinto tamaño de flotantes de mayor a menor tamaño; entre sus funciones están la de evitar obstrucciones, proteger los equipos y aumentar la eficacia del tratamiento posterior. La homogeneización consiste en una balsa de agua para facilitar el equilibrado del pH (6,5-8,5) y de los nutrientes, y conseguir una homogeneización del caudal y de la carga orgánica. La aireación prolongada con fangos activos es una manera de imitar el proceso natural de depuración en la naturaleza; hay microorganismos agrupados en flóculos que se encuentran en suspensión en una balsa de activación y biodegradan la materia orgánica presente en el agua residual gracias a la aireación constante con difusores de aire sumergidos. En la decantación se produce la deposición de la materia orgánica biodegradada en la aireación con fangos activos y el posterior espesamiento del fango en el fondo del decantador, el tiempo es de aproximadamente 2 horas. Por último, se filtra el agua con un filtro de arena pasando el agua a tratar por un medio poroso que retiene patógenos y partículas en suspensión.

En cuanto al primer objetivo: se ha estudiado la eficacia de la electroporación aislada para distintos caudales de agua en cuanto a la eliminación de la bacteria *Escherichia coli*, de virus (colífagos), de esporas, de clostridium (generador de esporas) y de coliformes fecales. Además, se ha recogido la concentración de subproductos no deseados de la electroporación a la entrada de los reactores y a la salida para los distintos caudales, para estudiar si en la electroporación se generan o no más subproductos, de los cuales la mayoría son procedentes del cloro.

Al observar los resultados se apreció que la eficacia de desinfección para esporas y clostridium no era la deseada, por lo que se repitió el proceso para caudales de 15 y 20 m³/h, pero esta vez dejando un tiempo para que el cloro generado en el propio proceso



de electroporación ejerciese su poder de desinfección. Los datos se tomaron dejando un tiempo de 20 minutos entre medidas, desde tiempo cero hasta una hora.

A continuación, se incluye un diagrama de bloques que sirve de aclaración para entender mejor los procesos llevados a cabo para este primer ensayo.

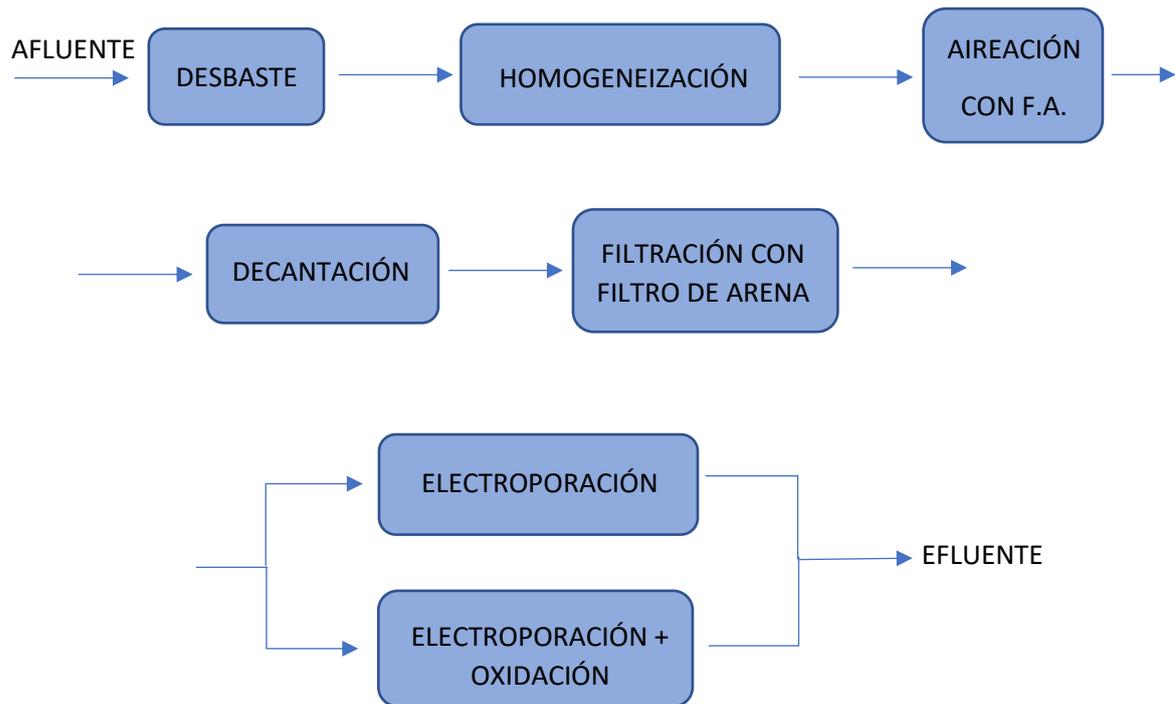


Diagrama 1: Esquema de procesos que atraviesa el agua en la EDAR.

A continuación, se ha querido estudiar la eficacia de la aplicación de campos pulsados, para ello se ha medido, para caudales de 10 y 15 m³/h y para distintas condiciones de operación, la concentración a la salida de *Escherichia coli* y de coliformes totales con distintos tiempos de aplicación de corriente. Además, para esos caudales y para esas condiciones de operación, se han tomado medidas de la concentración de cloro libre en el agua a la salida para ver cuál es la proporción óptima de tiempo de pulsado y de reposo de aplicación del campo. También se ha calculado el consumo y el ahorro de energía en función del tiempo de pulsado. En este caso el recorrido que ha seguido el afluente de agua residual es el mismo que para los ensayos anteriores, pero en el último paso no se produce oxidación ya que los datos han sido tomados sin haber



dejado el tiempo necesario para que el cloro generado en la electroporación ejerciese su capacidad de oxidación.

Por último, sobre el estudio de la Legionella, se ha llevado a cabo un proceso similar al inicial: para un único caudal de 15 m³/h se ha medido la concentración de Legionella a la entrada y a la salida del proceso de electroporación y una hora después del tratamiento (cuando el cloro generado ya ha actuado). Con estas medidas se ha podido calcular el rendimiento de desinfección de Legionella. En este caso el recorrido que ha seguido el afluente de agua residual es el mismo que el del *Diagrama 1*, pero en el último paso no se produce electroporación aislada ya que los datos han sido tomados habiendo dejado el tiempo necesario para que el cloro generado en la electroporación ejerciese su capacidad de oxidación.

7. Resultados y discusión

7.1. Estudio general del método de electroporación

Con los resultados obtenidos del equipo de la planta de tratamiento de aguas residuales, que se recogerán en tablas más adelante, se va a estudiar la eficacia del proceso de electroporación para distintos caudales de agua, viendo su potencial de desinfección en cuanto a la eliminación de la bacteria *Escherichia coli*, de virus (colífagos), de esporas, de clostridium (generador de esporas particularmente complicado de eliminar) y de coliformes fecales. Además, se han tomado las medidas de las concentraciones de subproductos no deseados a la entrada y a la salida de los reactores para los distintos caudales y también en función del tiempo de desinfección del cloro residual generado, para observar si durante la electroporación se generan o no más cantidades de estos derivados.

Como se verá tras estos primeros análisis, al observar los resultados para la desinfección de esporas y de clostridium, la eficacia del método en estos casos no es la deseada. Como consecuencia, se decidió repetir el mismo proceso para caudales de 15 y de 20 m³/h, pero esta vez dejando un tiempo para que el cloro generado en el propio proceso de electroporación pudiese ejercer su poder de desinfección, actuando de este



modo la oxidación además de la electroporación. Estas nuevas medidas se tomaron dejando un tiempo de retención entre medida y medida de 20 minutos, partiendo de tiempo cero hasta llegar a una hora.

Todos los datos han sido tomados para un agua residual con las características que quedan recogidas en la *Tabla 1*.

DATOS AGUA	
pH	7,59
Conductividad	4,75
Cloro	0
DQO	20,3
Amonio	0,628
Nitrito	0,07
Nitrato	1,07
Nitrógeno Total	6,19
Fósforo Total	0,224

Tabla 1: Características del agua residual tratada.

7.1.1. Estudio de subproductos afectados por la electroporación en función del caudal

A continuación, se recogen en la *Tabla 2* las medidas tomadas de las concentraciones de subproductos generados durante el proceso de electroporación, la mayoría de ellos productos derivados del cloro, antes y después de su paso por los reactores del equipo. Esta toma de datos se realiza para caudales de 5, 10, 15 y 20 m³/h respectivamente, obteniendo los siguientes resultados medidos en mg/l, salvo el caso de los cloritos que están medidos en µg/l.

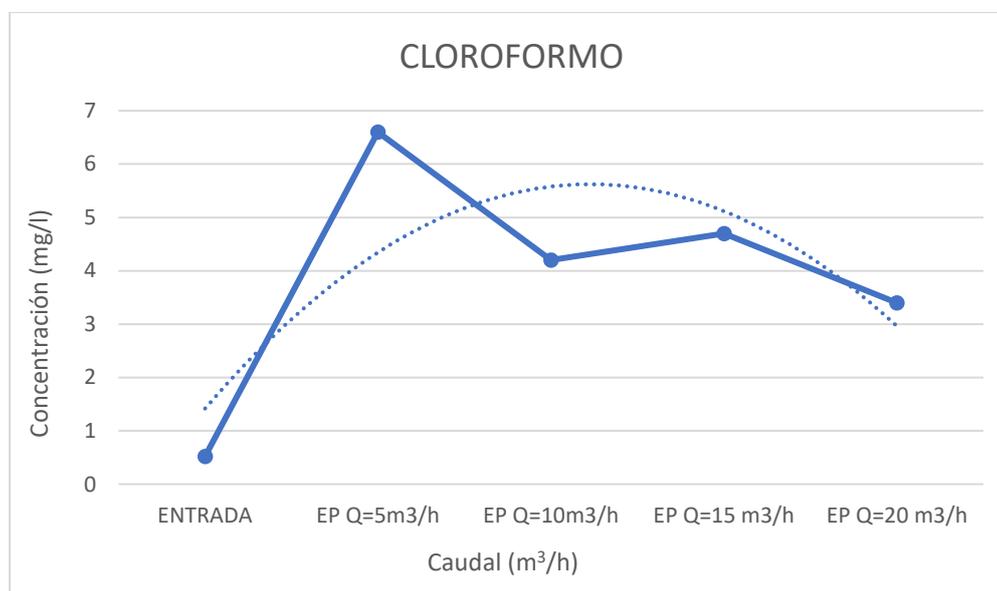
	ENTRADA	EP Q=5 m ³ /h	EP Q=10 m ³ /h	EP Q=15 m ³ /h	EP Q=20 m ³ /h
CLOROFORMO	0,52	6,6	4,2	4,7	3,4
BROMODICLOROMETANO	<5	8,2	<5	6	<5
DIBROMOCLOROMETANO	<5	18	11	14	<5
BROMOFORMO	<5	14	8,1	12	<5
CLORAMINAS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
CLORATOS	<0,1	3,7	2	1,3	1,2



CLORITOS ($\mu\text{g/l}$)	<50	<50	<50	<50	<50
PERCLORATOS	7	8,6	7,6	12	9,8

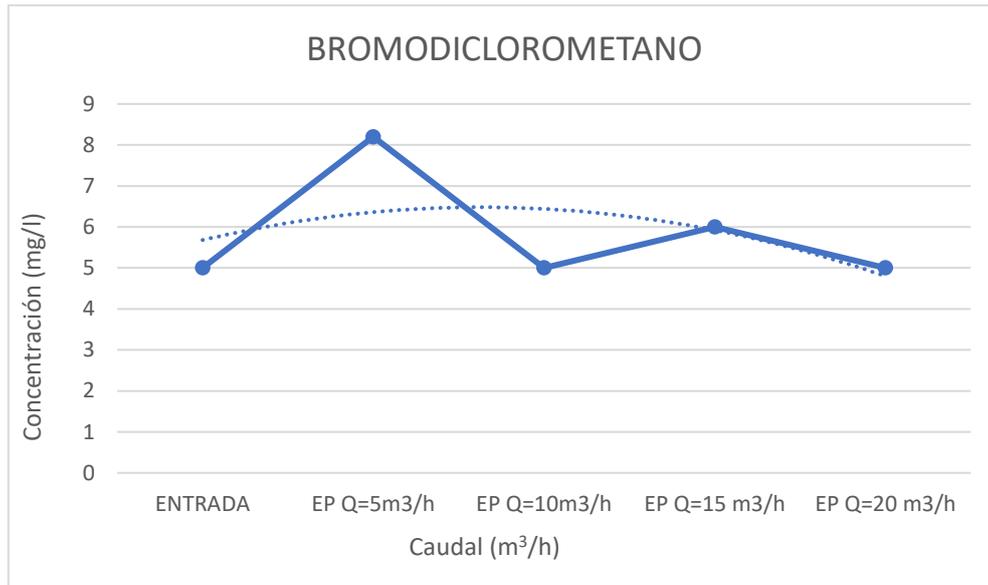
Tabla 2: Concentraciones de subproductos a la entrada y a la salida de los reactores en función del caudal.

Para una mejor comprensión de estos resultados y para observar las tendencias que tienen las concentraciones de esos compuestos a su paso por las celdas de electroporación, en las siguientes gráficas se muestra la concentración de cada subproducto a la entrada y a la salida de los reactores en función de los diferentes caudales, así como la línea de tendencia que tienen esos mismos datos.



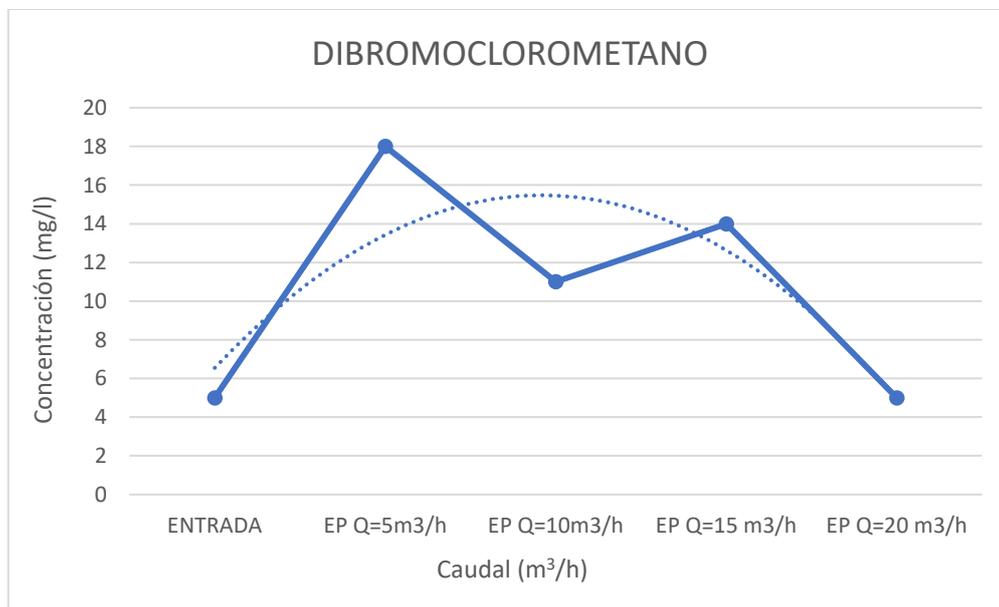
Gráfica 1: Concentración en mg/l de cloroformo en función del caudal.

Se aprecia como la concentración de cloroformo aumenta cuando pasa por los reactores al sufrir la electroporación, siendo el crecimiento de la concentración mucho mayor cuanto menor es el caudal de tratamiento.



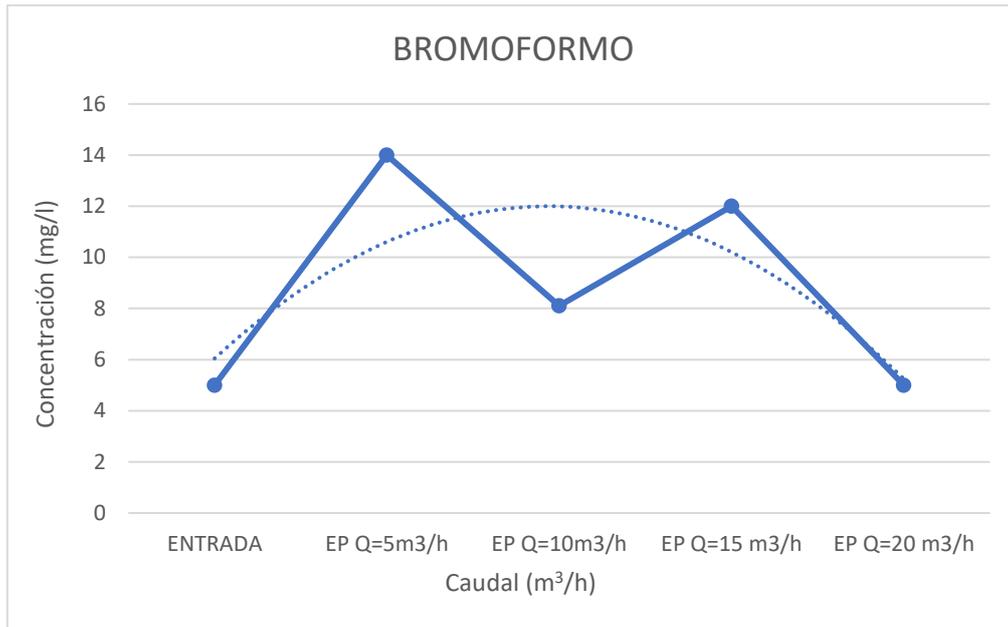
Gráfica 2: Concentración en mg/l de bromodiclorometano en función del caudal.

En este caso, con el bromodiclorometano se observa una tendencia similar a la del cloroformo, aunque en este caso el aumento de la concentración a su paso por las celdas no es tan acentuado como con el cloroformo.



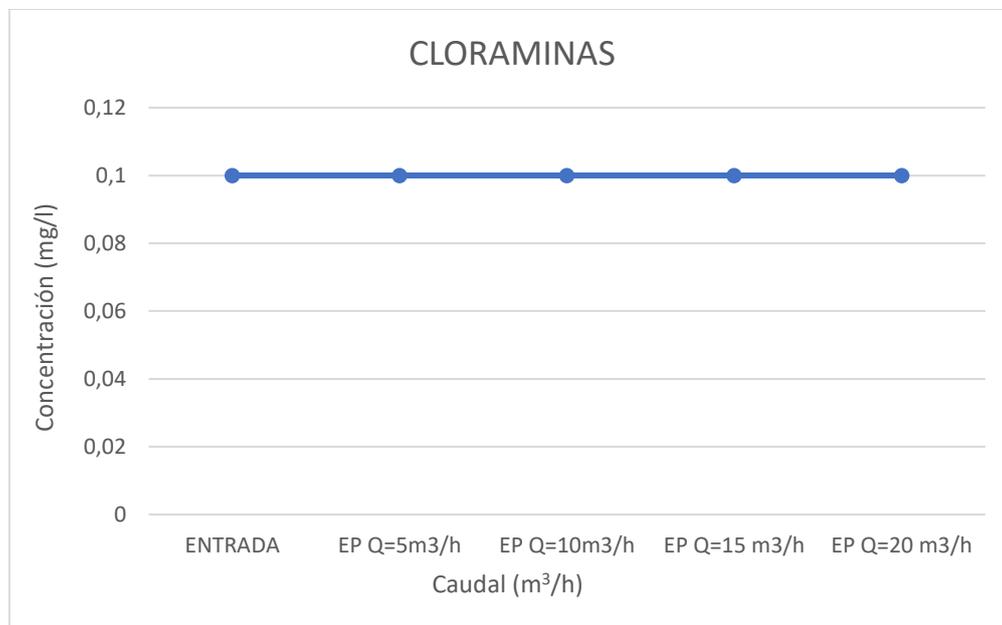
Gráfica 3: Concentración en mg/l de dibromoclorometano en función del caudal.

De nuevo se observa una tendencia similar a las anteriores, al pasar por los reactores la concentración de dibromoclorometano aumenta más cuanto menor sea el caudal de operación.



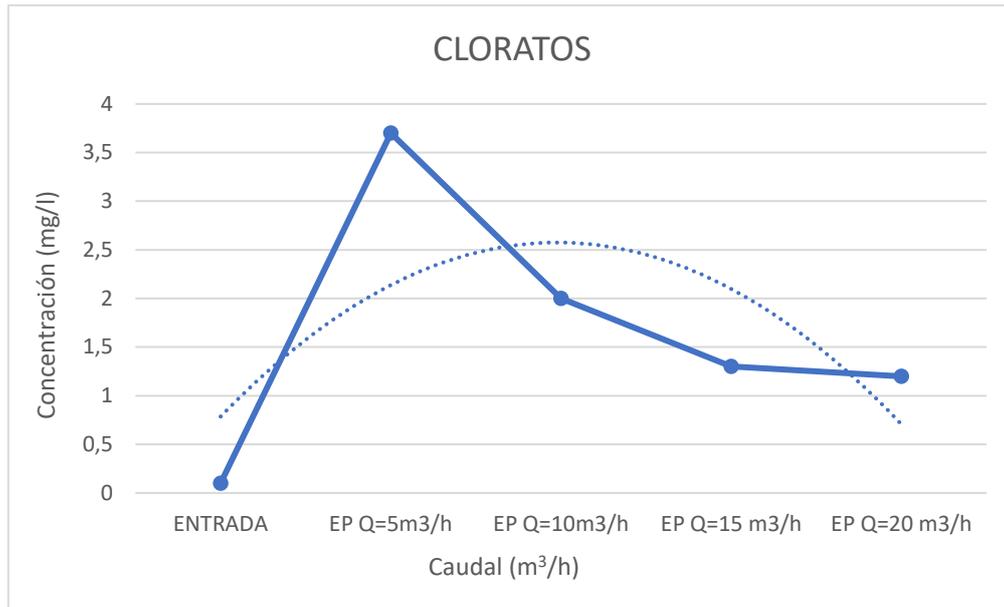
Gráfica 4: Concentración en mg/l de bromoformo en función del caudal.

Al igual que en los casos anteriores, aunque de forma menos clara con los caudales de 10 y 15 m³/h, se observa un aumento de concentración de bromoformo que parece ser mayor cuanto menor sea el caudal de tratamiento.



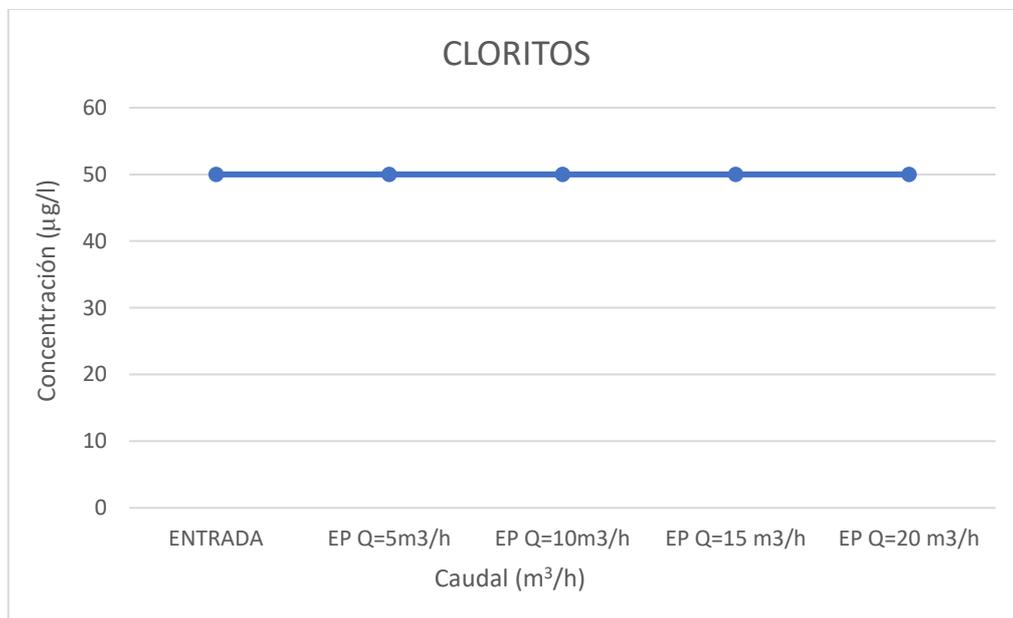
Gráfica 5: Concentración en mg/l de cloraminas en función del caudal.

En el caso de las cloraminas, la concentración de estas no se ve afectada a su paso por las celdas de electroporación independientemente del caudal de tratamiento.



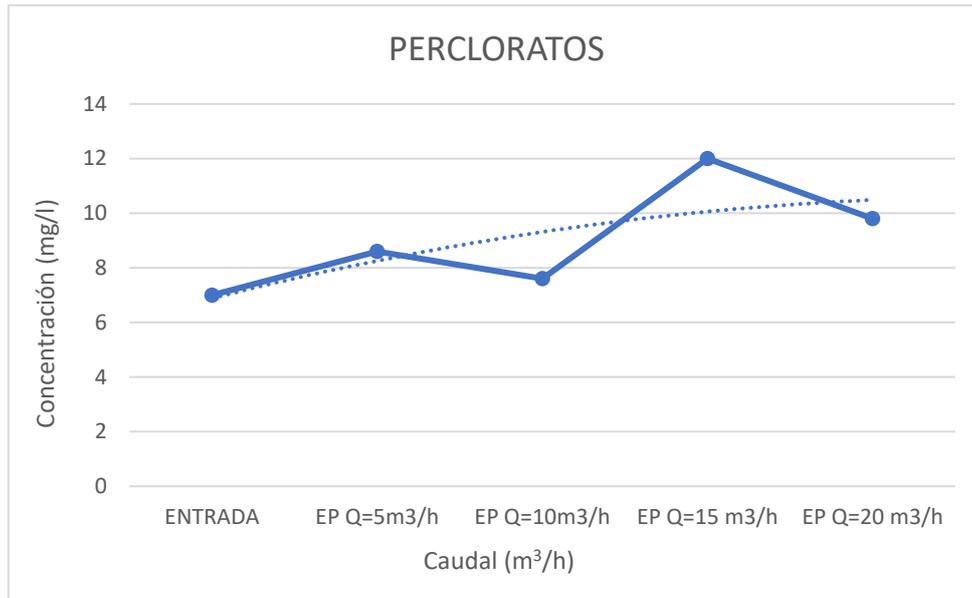
Gráfica 6: Concentración en mg/l de cloratos en función del caudal.

Con los cloratos se observa de nuevo un aumento de su concentración al sufrir la electroporación. Como en los casos anteriores, cuanto menor es el caudal del tratamiento mayor es el aumento de la concentración de cloratos.



Gráfica 7: Concentración en µg/l de cloritos en función del caudal.

En este caso, la concentración de cloritos no se ve afectada por la electroporación.



Gráfica 8: Concentración en mg/l de percloratos en función del caudal.

Por último, la concentración de percloratos también aumenta a su paso por los reactores, pero esta vez parece que lo hace de forma más o menos proporcional al caudal de tratamiento, es decir, que la concentración a la salida es mayor cuanto mayor sea el caudal.

7.1.2. Estudio de subproductos afectados por la electroporación y el tiempo de oxidación

Al observar los resultados de estos primeros ensayos, la eficacia de desinfección del método para esporas y clostridium no es la deseada. Como consecuencia, se ha decidido repetir el mismo proceso para caudales de 15 y de 20 m³/h, pero esta vez dejando un tiempo para que el cloro generado en el propio proceso de electroporación pudiese ejercer su poder de desinfección, actuando de este modo la oxidación además de la electroporación. Estas nuevas medidas se han tomado dejando un tiempo de retención entre medida y medida de 20 minutos, partiendo de tiempo cero hasta llegar a una hora.

A continuación, se recogen en la *Tabla 3* las medidas tomadas de las concentraciones de subproductos generados durante el proceso de electroporación, la mayoría de ellos productos derivados del cloro, antes y después de su paso por los reactores del equipo. Esta toma de datos se realiza para un caudal de 15 m³/h esta vez dejando el tiempo de



oxidación mencionado, obteniendo los siguientes resultados medidos en mg/l, salvo el caso de los cloritos que están medidos en µg/l.

	ENTRADA	EP Q=15m ³ /h t=0min	EP Q=15m ³ /h t=20min	EP Q=15m ³ /h t=40min	EP Q=15m ³ /h t=60min
CLOROFORMO	0,52	4,7	6	6,5	6,3
BROMODICLOROMETANO	<5	6	19	21	22
DIBROMOCLOROMETANO	<5	14	54	54	58
BROMOFORMO	<5	12	74	72	76
CLORAMINAS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
CLORATOS	<0,1	1,3	1,5	1,2	1,3
CLORITOS (µg/l)	<50	<50	<50	<50	<50
PERCLORATOS	7	12	9,8	12	10,4

Tabla 3: Concentraciones de subproductos para un caudal de 15 m³/h en función del tiempo de oxidación.

A continuación, se recogen en la *Tabla 4* las medidas tomadas de las concentraciones de subproductos generados durante el proceso de electroporación, la mayoría de ellos productos derivados del cloro, antes y después de su paso por los reactores del equipo. Esta toma de datos se realiza para un caudal de 20 m³/h esta vez dejando el tiempo de oxidación mencionado, obteniendo los siguientes resultados medidos en mg/l, salvo el caso de los cloritos que están medidos en µg/l.

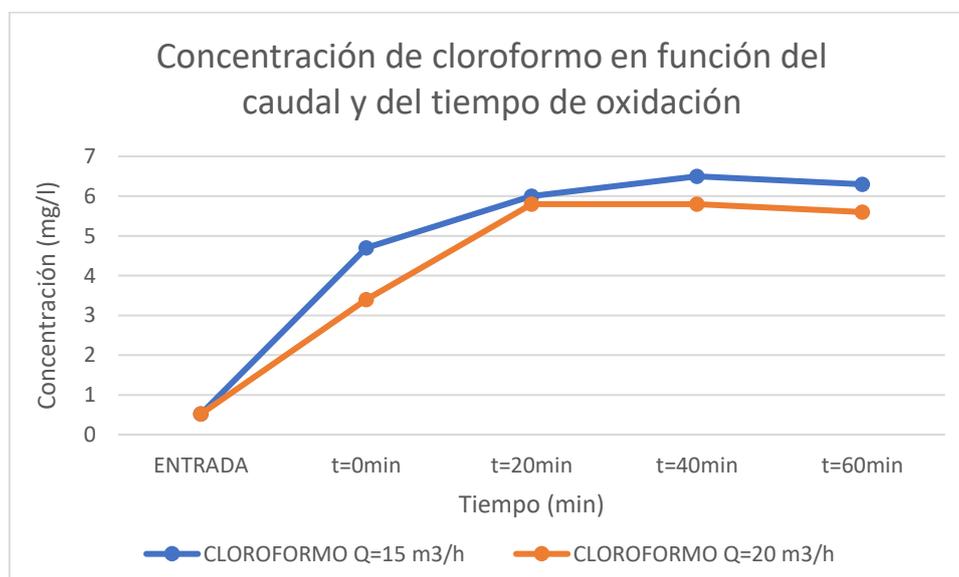
	ENTRADA	EP Q=20m ³ /h t=0 min	EP Q=20m ³ /h t=20min	EP Q=20m ³ /h t=40min	EP Q=20m ³ /h t=60min
CLOROFORMO	0,52	3,4	5,8	5,8	5,6
BROMODICLOROMETANO	<5	<5	15	17	20
DIBROMOCLOROMETANO	<5	<5	38	41	46
BROMOFORMO	<5	<5	41	45	48
CLORAMINAS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
CLORATOS	<0,1	1,2	1,3	1,3	1,3
CLORITOS (µg/l)	<50	<50	<50	<50	<50



PERCLORATOS	7	9,8	6,3	16	5,7
--------------------	---	-----	-----	----	-----

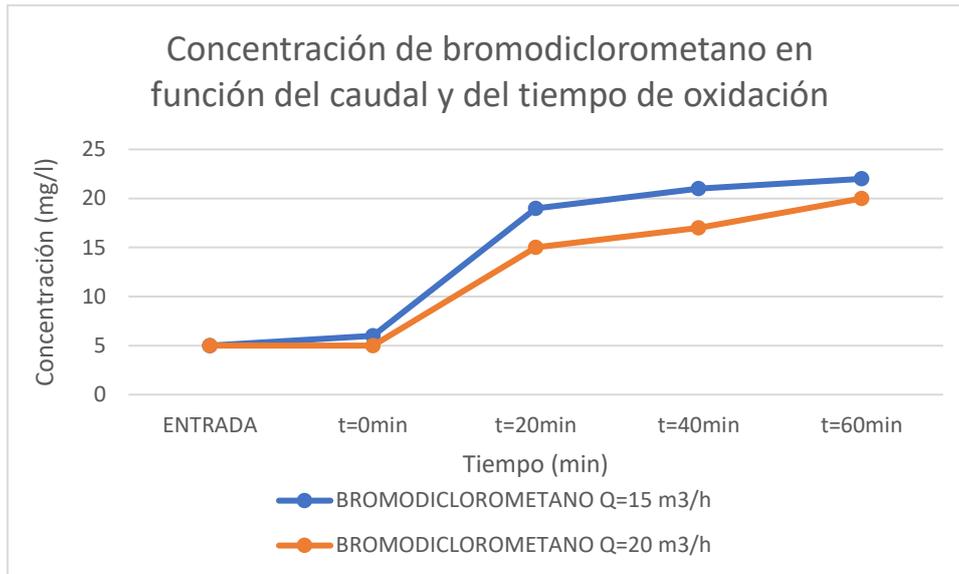
Tabla 4: Concentraciones de subproductos para un caudal de 20 m³/h en función del tiempo de oxidación.

Para una mejor comprensión de los resultados recogidos en las *Tablas 3 y 4*, y para observar las tendencias que tienen las concentraciones de esos compuestos a su paso por las celdas de electroporación, en las siguientes gráficas se muestra la concentración de cada subproducto a la entrada y a la salida de los reactores en función de los caudales de 15 y de 20 m³/h y en función del tiempo de oxidación que ha pasado desde el momento que sufre la electroporación.



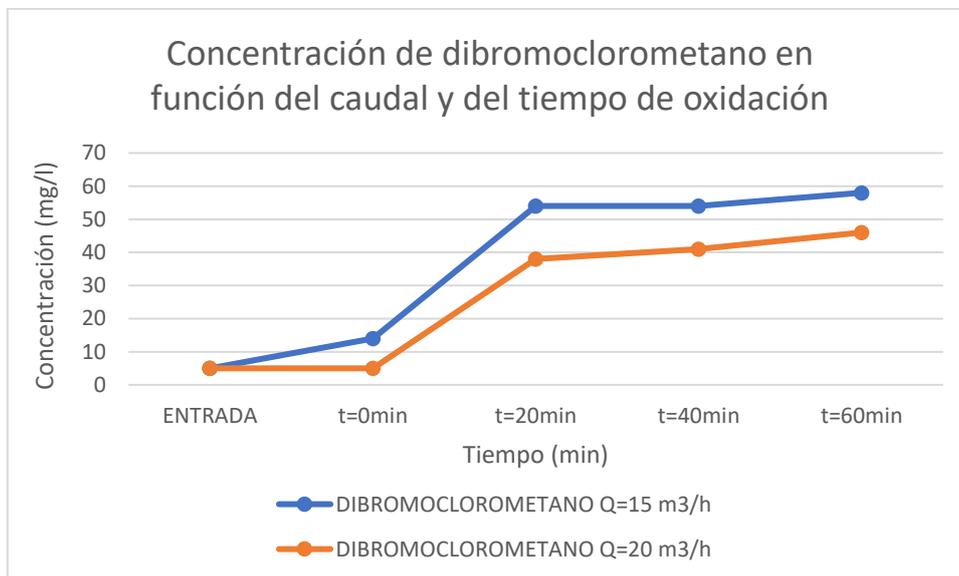
Gráfica 9: Concentración en mg/l de cloroformo en función de caudal y tiempo de oxidación.

En esta gráfica se aprecia que, para ambos caudales, la concentración de cloroformo sigue aumentando conforme pasa el tiempo de oxidación. Según la gráfica la mejor situación, es decir, la que conlleva menor aumento de concentración de cloroformo, sería la de mayor caudal (20 m³/h) y menor tiempo de oxidación (tiempo cero).



Gráfica 10: Concentración en mg/l de bromodiclorometano en función de caudal y tiempo de oxidación.

En el caso del bromodiclorometano, se ve la misma tendencia que para el cloroformo, por lo que las condiciones de operación que más convienen son un caudal de tratamiento grande y un tiempo de oxidación corto.

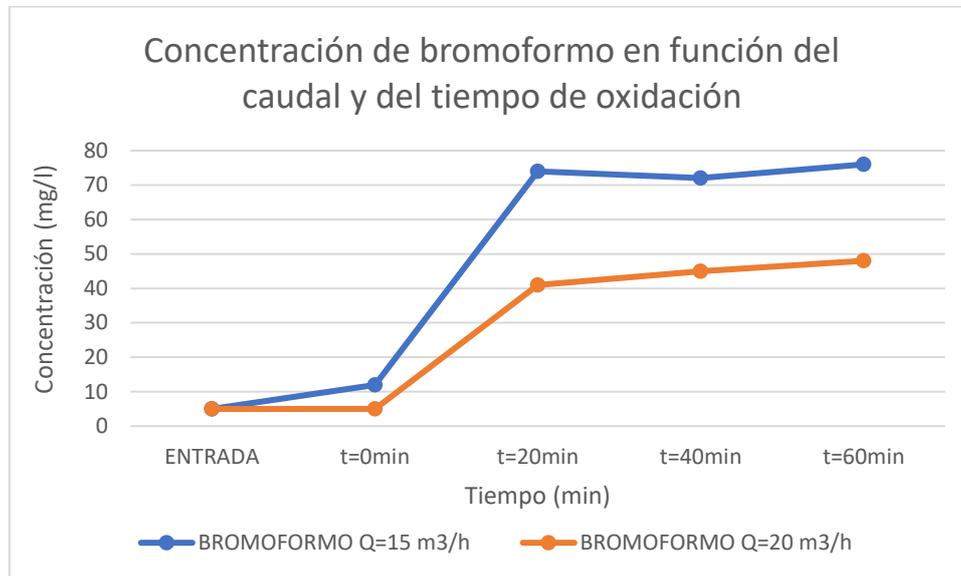


Gráfica 11: Concentración en mg/l de dibromoclorometano en función de caudal y tiempo de oxidación.

Con el dibromoclorometano se observa de nuevo la misma situación que en los casos anteriores, a medida que pasa tiempo de oxidación la concentración del subproducto

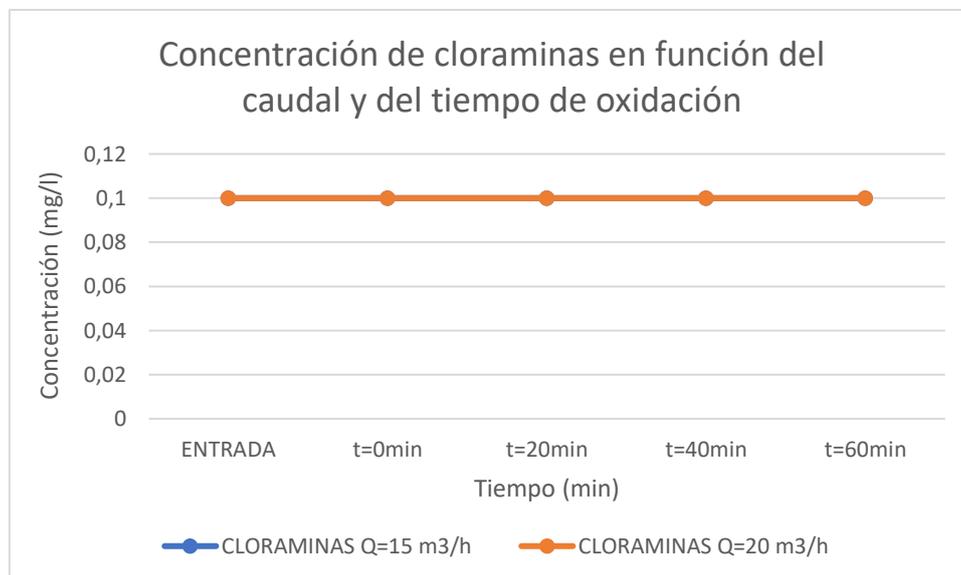


sigue aumentando, por lo que más nos interesa es mantener un caudal alto y un tiempo de oxidación de oxidación mínimo.



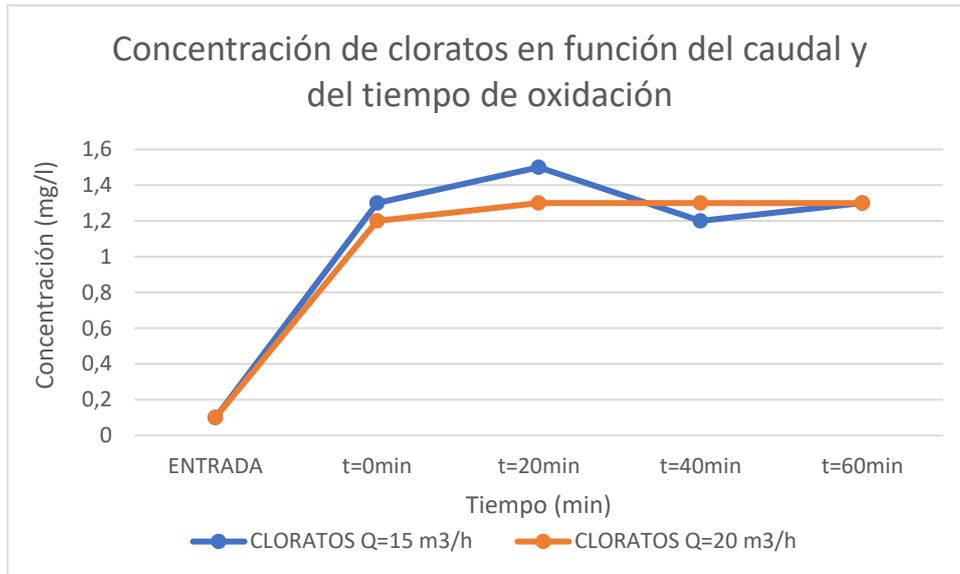
Gráfica 12: Concentración en mg/l de bromoformo en función de caudal y tiempo de oxidación.

En el caso del bromoformo, se vuelve a observar el mismo caso que para los subproductos anteriores.



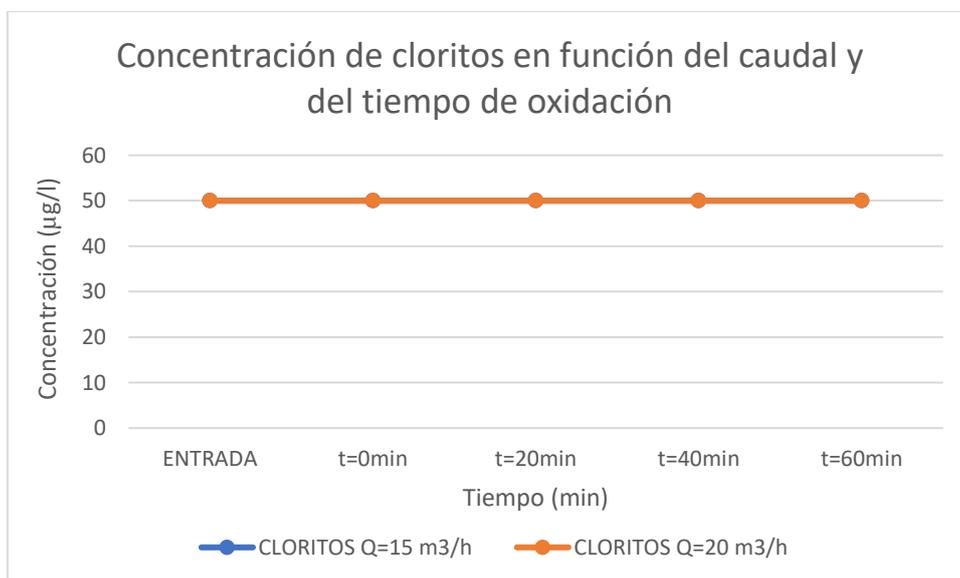
Gráfica 13: Concentración en mg/l de cloraminas en función de caudal y tiempo de oxidación.

En este caso, la concentración de cloraminas no se ve afectada ni por el caudal de tratamiento ni por el tiempo de oxidación, ya que la concentración inicial permanece constante en todo momento.



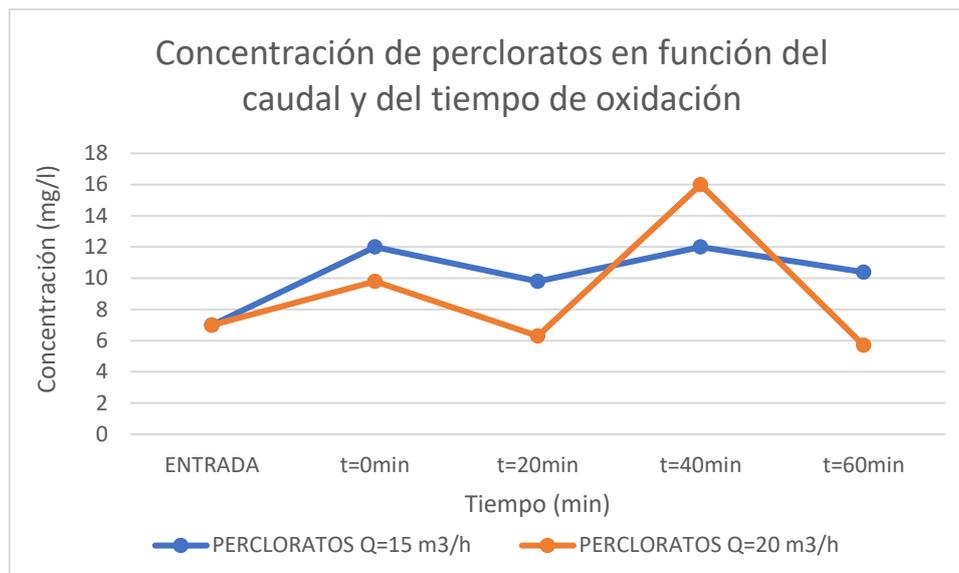
Gráfica 14: Concentración en mg/l de cloratos en función de caudal y tiempo de oxidación.

En este caso, la concentración de cloratos se dispara tras sufrir el proceso de electroporación, y al contrario que en los casos anteriores, se mantienen más o menos constante a lo largo del proceso de oxidación.



Gráfica 15: Concentración en µg/l de cloritos en función de caudal y tiempo de oxidación.

Al igual que en el caso de las cloraminas, la concentración de cloritos no se ve afectada ni por el caudal ni por el tiempo posterior de oxidación: la concentración permanece constante a lo largo del tiempo.



Gráfica 16: Concentración en mg/l de percloratos en función de caudal y tiempo de oxidación.

En este último caso, la concentración de percloratos no sigue una tendencia clara en función del caudal y del tiempo de oxidación, por lo que no puede decirse nada sobre las condiciones de operación óptimas.

7.1.3. Efecto de desinfección de la electroporación en función del caudal

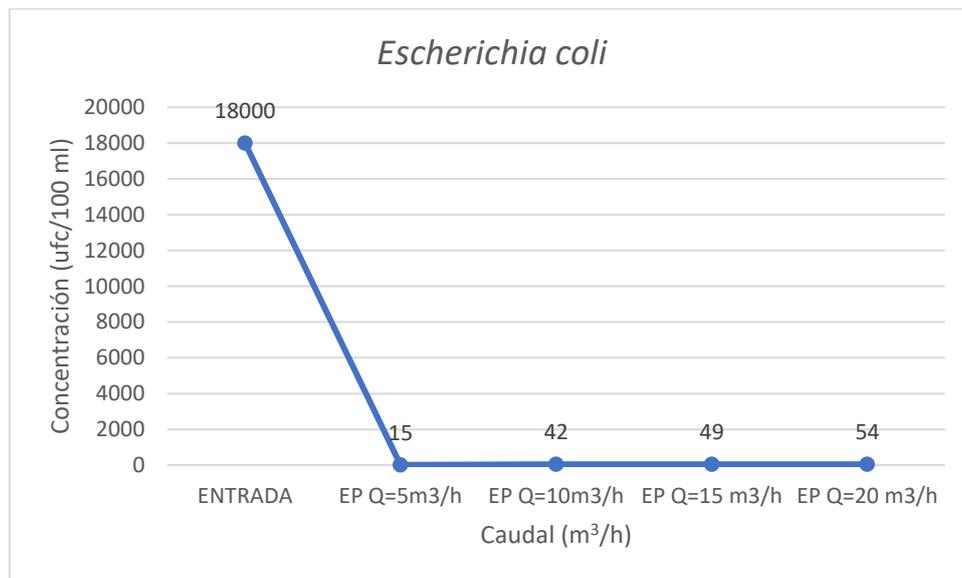
En la *Tabla 5* se recogen los resultados tomados de los ensayos de medida de las concentraciones de *Escherichia coli*, colifagos, esporas, clostridium y coliformes fecales a la entrada y a la salida de las celdas electrolíticas para distintos caudales de tratamiento, en concreto caudales de 5, 10, 15 y 20 m³/h.

	ENTRADA	EP Q=5 m ³ /h	EP Q=10 m ³ /h	EP Q=15 m ³ /h	EP Q=20 m ³ /h
E COLI	18000	15	42	49	54
COLIFAGOS	2	<1	1	<1	<1
ESPORAS	1100	420	400	420	700
CLOSTRIDIUM	1000	460	400	460	1000
COLIFORMES FECALES	100000	1	2	2	12

Tabla 5: Concentraciones en unidades/100 ml a la entrada y a la salida de los reactores en función del caudal.

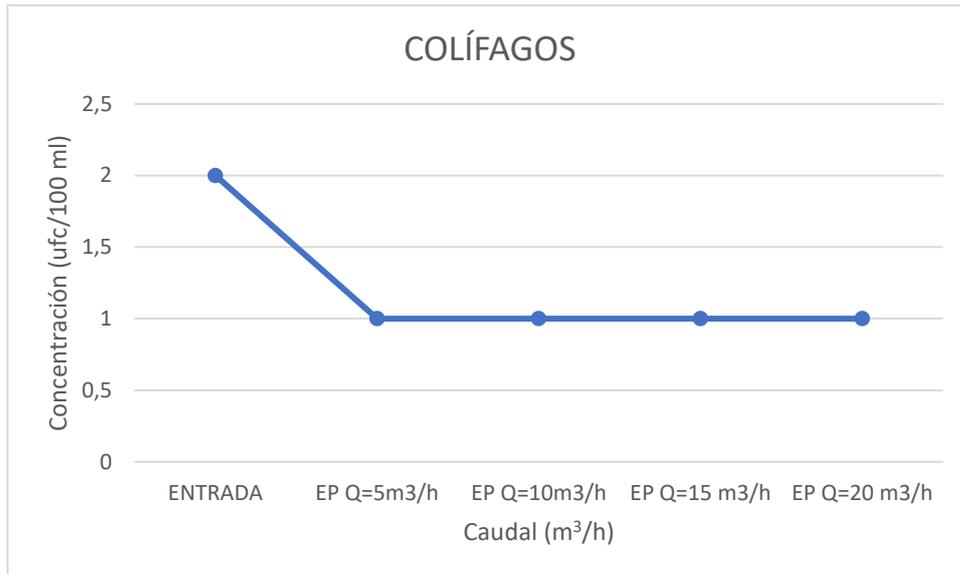


Para una mejor comprensión de estos resultados y para observar las tendencias que tienen las concentraciones de esos organismos a su paso por las celdas de electroporación, en las siguientes gráficas se muestra la concentración de cada elemento a la entrada y a la salida de los reactores en función de los diferentes caudales mencionados.



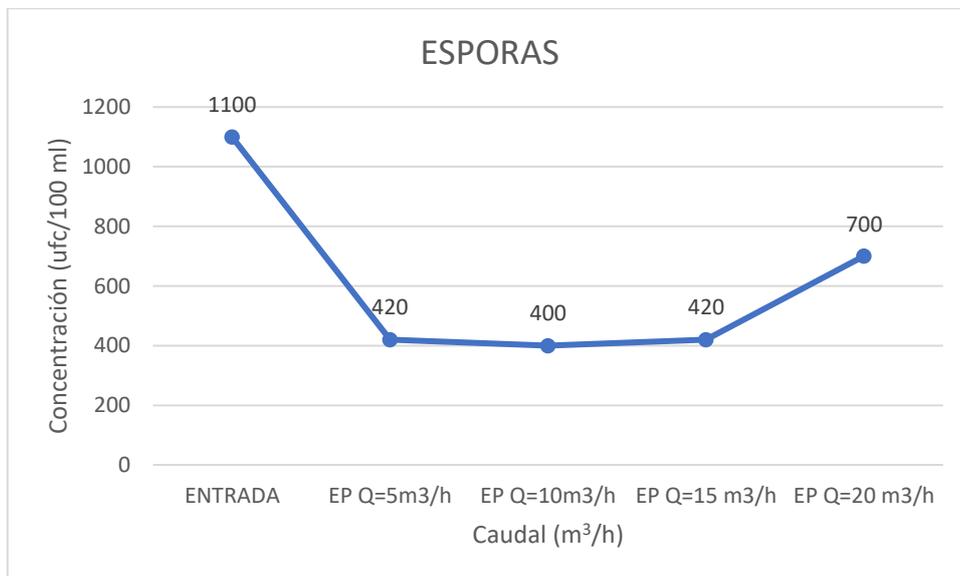
Gráfica 17: Concentración de *Escherichia coli* a la entrada y salida de los reactores en función del caudal.

En cuanto a la bacteria *Escherichia coli*, se ve como el proceso de electroporación elimina prácticamente el 100% de esta en todos los casos, independientemente de los caudales estudiados; aunque parece que el rendimiento es incluso mejor para caudales pequeños de agua.

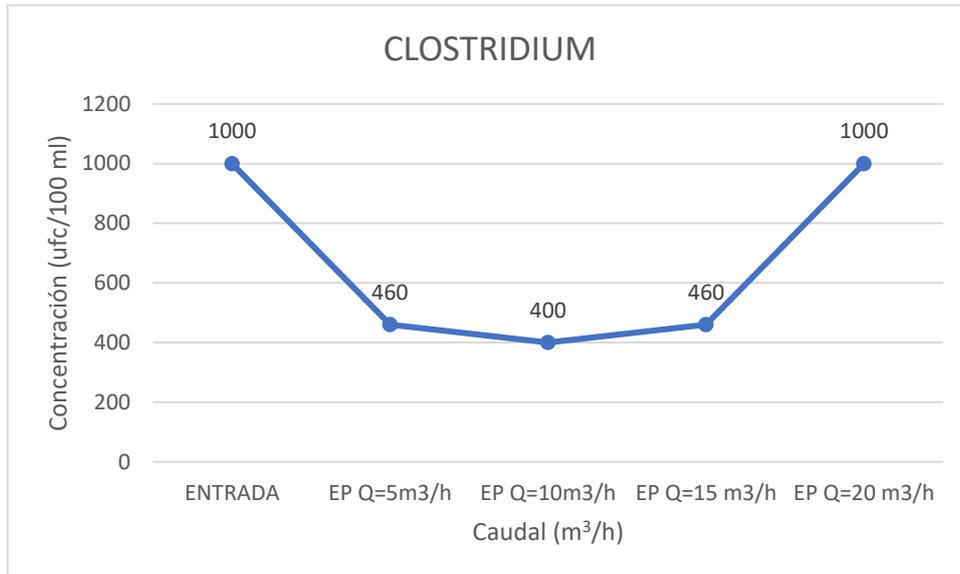


Gráfica 18: Concentración de colifagos a la entrada y salida de los reactores en función del caudal.

En este caso la concentración de colifagos se ve reducida a la mitad tras el proceso de electroporación independientemente del caudal con el que se haya trabajado.

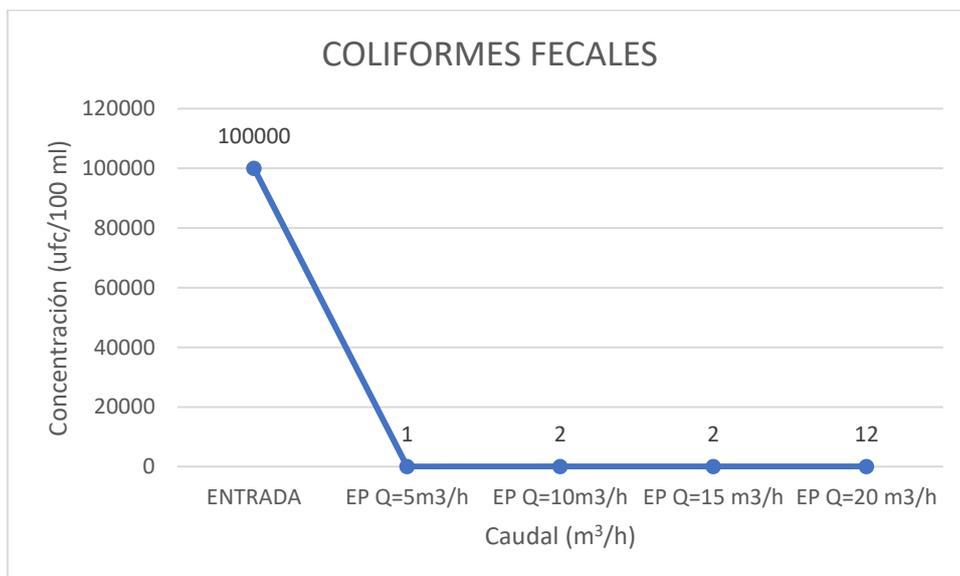


Gráfica 19: Concentración de esporas a la entrada y salida de los reactores en función del caudal.



Gráfica 20: Concentración de clostridium a la entrada y salida de los reactores en función del caudal.

En las Gráficas 19 y 20 se observa que tanto la concentración de esporas como la de clostridium se reduce en un 50% aproximadamente para caudales de tratamiento pequeños, pero que al aumentar el caudal a un valor de 20 m³/h las concentraciones de estos organismos apenas se reducen.



Gráfica 21: Concentración de coliformes fecales a la entrada y salida de los reactores en función del caudal.



En cuanto a los coliformes fecales, se ve como el proceso de electroporación elimina prácticamente el 100% de estos en todos los casos, independientemente del caudal que se imponga.

Para poder calcular la eficacia de desinfección del método de electroporación se ha aplicado a los resultados de los ensayos anteriores la *Ecuación 1*, obteniendo los rendimientos de la *Tabla 6*, que están en función de cada organismo y del caudal de tratamiento.

$$\% \text{ desinfección} = \frac{C_{\text{entrada}} - C_{\text{salida}}}{C_{\text{entrada}}} \cdot 100$$

Ecuación 1: Expresión para calcular el porcentaje de desinfección en función de la concentración a la entrada y a la salida.

	REDUCCIÓN DESINFECCIÓN EP			
	EP Q=5 m ³ /h	EP Q=10 m ³ /h	EP Q=15 m ³ /h	EP Q=20 m ³ /h
E COLI	99,92%	99,77%	99,73%	99,70%
COLIFAGOS	>50%	50,00%	>50%	>50%
ESPORAS	61,82%	63,64%	61,82%	36,36%
CLOSTRIDIUM	54,00%	60,00%	54,00%	0,00%
COLIFORMES FCALES	99,999%	99,998%	99,998%	99,988%

Tabla 6: Eficiencia de desinfección del método de electroporación en función del caudal.

Al observar esta tabla se aprecia que la eficacia de desinfección para *Escherichia coli* y para coliformes fecales es excelente, estando todas por encima del 99% independientemente del caudal de tratamiento. El rendimiento de eliminación de colifagos está en torno al 50% en todos los casos, con lo que se entiende que no le afecta el caudal empleado; este rendimiento puede parecer, a priori, bajo, pero al ver que la concentración a la entrada es solo de 2 unidades/100 ml parece suficiente el rendimiento obtenido. Por último, en cuanto a la desinfección de esporas y de clostridium, los rendimientos para los caudales más bajos (5,10 y 15 m³/h) están en torno a un 60%, mientras que para el caudal de 20 m³/h la reducción de esporas baja a un 36% y la de clostridium es nula. Viendo la concentración a la entrada de estos organismos, la eficacia de desinfección obtenida de los ensayos realizados parece que no es suficiente.



7.1.4. Efecto de desinfección de la electroporación en función del caudal y del tiempo de oxidación

Como se ha dicho previamente, al observar los resultados de estos primeros ensayos, la eficacia de desinfección del método para esporas y clostridium no es la deseada. Como consecuencia, se ha decidido repetir el mismo proceso para caudales de 15 y de 20 m³/h, pero esta vez dejando un tiempo para que el cloro generado en el propio proceso de electroporación pudiese ejercer su poder de desinfección, actuando de este modo la oxidación además de la electroporación. Estas nuevas medidas se han tomado dejando un tiempo de retención entre medida y medida de 20 minutos, partiendo de tiempo cero hasta llegar a una hora.

A continuación, se recogen en la *Tabla 7* las medidas tomadas de las concentraciones de organismos eliminados durante el proceso de electroporación, antes y después de su paso por los reactores del equipo. Este ensayo se realiza para un caudal de 15 m³/h esta vez dejando el tiempo de oxidación mencionado, obteniendo los siguientes resultados medidos en unidades/100 ml de agua problema.

	ENTRADA	EP Q=15m ³ /h t=0min	EP Q=15m ³ /h t=20min	EP Q=15m ³ /h t=40min	EP Q=15m ³ /h t=60min
E COLI	18000	49	2	3	<1
COLIFAGOS	2	<1	<1	<1	<1
ESPORAS	1100	420	370	500	320
CLOSTRIDIUM	1000	460	350	290	360

Tabla 7: Concentraciones en unidades/100 ml para un caudal de 15m³/h en función del tiempo de oxidación.

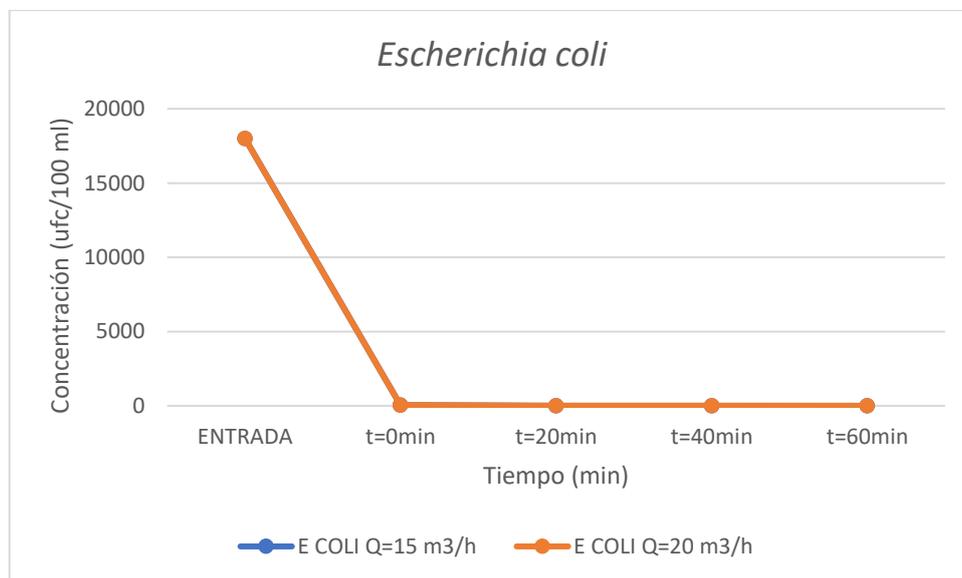
A continuación, se recogen en la *Tabla 7* las medidas tomadas de las concentraciones de organismos eliminados durante el proceso de electroporación, antes y después de su paso por los reactores del equipo. Este ensayo se realiza para un caudal de 20 m³/h esta vez dejando el tiempo de oxidación mencionado, obteniendo los siguientes resultados medidos en unidades/100 ml de agua problema.

	ENTRADA	EP Q=20m ³ /h t=0 min	EP Q=20m ³ /h t=20min	EP Q=20m ³ /h t=40min	EP Q=20m ³ /h t=60min
E COLI	18000	54	<1	<1	<1
COLIFAGOS	2	<1	<1	<1	<1
ESPORAS	1100	700	410	190	480
CLOSTRIDIUM	1000	1000	220	430	380



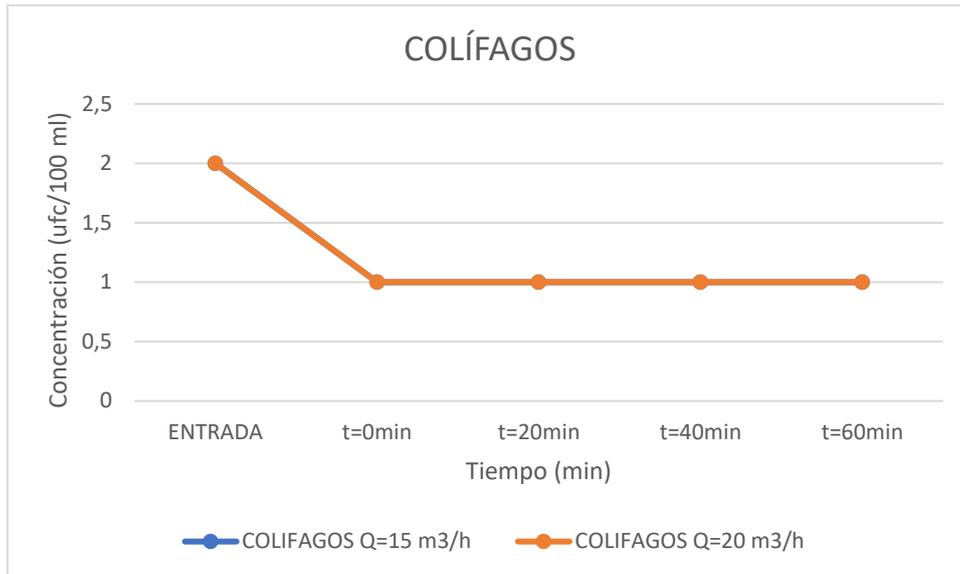
Tabla 8: Concentraciones en unidades/100 ml para un caudal de 20 m³/h en función del tiempo de oxidación.

Para una mejor comprensión de estos resultados y para observar las tendencias que tienen las concentraciones de esos organismos a su paso por las celdas de electroporación, en las siguientes gráficas se muestra la concentración de cada elemento a la entrada y a la salida de los reactores en función de los caudales de 15 y de 20 m³/h y en función del tiempo de oxidación que ha pasado desde el momento que sufre la electroporación.



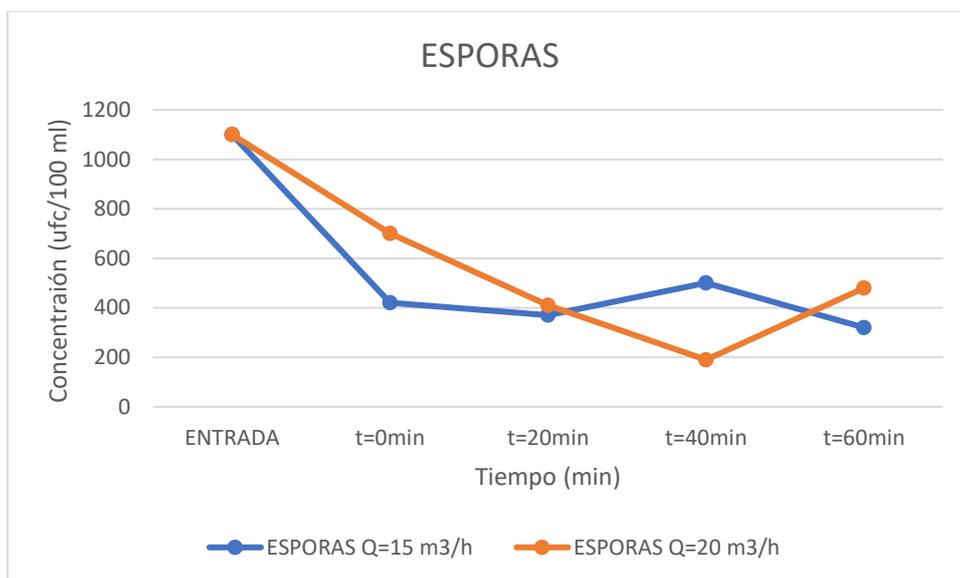
Gráfica 22: Concentración de *Escherichia coli* en función de caudal y tiempo de oxidación.

La eficacia de eliminación de *Escherichia coli* para caudales de 15 y 20 m³/h ya era excelente cuando el tiempo de oxidación era nulo, en este ensayo se muestra que es incluso mejor cuando se deja que actúe el cloro generado en la electroporación.



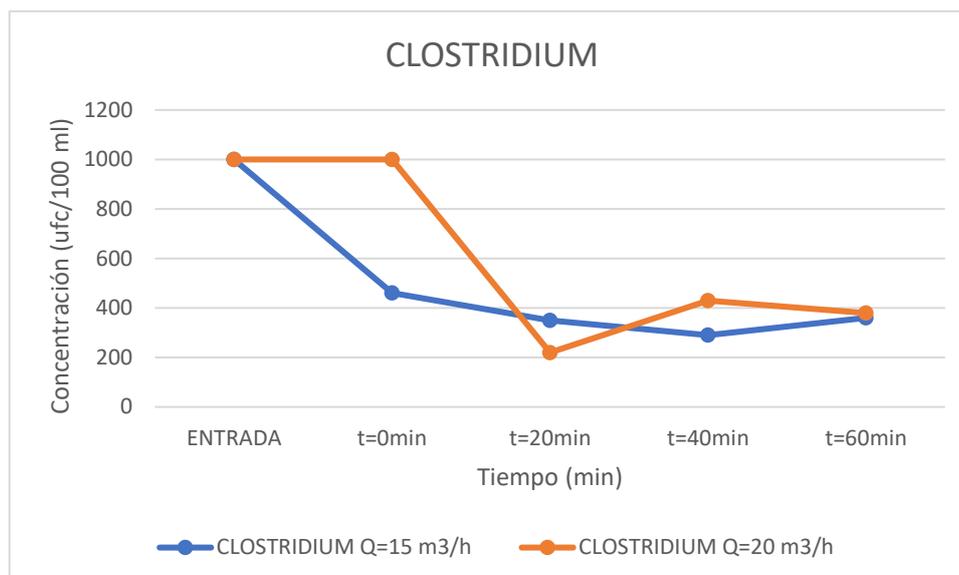
Gráfica 23: Concentración de colifagos en función de caudal y tiempo de oxidación.

En este caso la concentración de colifagos se ve reducida a la mitad independientemente del caudal con el que se haya trabajado y del tiempo de oxidación del cloro.



Gráfica 24: Concentración de esporas en función de caudal y tiempo de oxidación.

En el caso de las esporas parece que, dejando un tiempo de oxidación, para ambos caudales, se consiguen mejores rendimientos de eliminación que con tiempo cero. Para el caudal de 15 m³/h el tiempo óptimo es de 60 minutos, y para 20 m³/h es de 40 minutos.



Gráfica 25: Concentración de clostridium en función de caudal y tiempo de oxidación.

Por último, en el caso del clostridium de nuevo parece que, dejando un tiempo de oxidación, para ambos caudales, se consiguen mejores rendimientos de eliminación que con tiempo cero. Para el caudal de 15 m³/h el tiempo óptimo es de 40 minutos, y para 20 m³/h es de 20 minutos.

Para poder calcular la eficacia de desinfección del método de electroporación se ha aplicado a los resultados de los ensayos la Ecuación 2, obteniendo los rendimientos de las Tablas 9 y 10, que están en función de cada organismo, del caudal de tratamiento y del tiempo de oxidación tras la electroporación.

$$\% \text{ desinfección} = \frac{C_{\text{entrada}} - C_{\text{salida}}}{C_{\text{entrada}}} \cdot 100$$

Ecuación 2: Expresión para calcular el porcentaje de desinfección en función de la concentración a la entrada y a la salida.

	REDUCCIÓN DESINFECCIÓN EP+OX (Q=15 m ³ /h)			
	t=0 min	t=20 min	t=40 min	t=60 min
E COLI	99,73%	100,00%	100,00%	100,00%
COLIFAGOS	>50%	>50%	>50%	>50%
ESPORAS	61,82%	66,36%	54,55%	70,91%
CLOSTRIDIUM	54,00%	65,00%	71,00%	64,00%

Tabla 9: Eficiencia de desinfección del método de electroporación para un caudal de 15 m³/h en función del tiempo de oxidación.



	REDUCCIÓN DESINFECCIÓN EP+OX (Q=20 m ³ /h)			
	t=0 min	t=20 min	t=40 min	t=60 min
E COLI	99,70%	100,00%	100,00%	100,00%
COLIFAGOS	>50%	>50%	>50%	>50%
ESPORAS	36,36%	62,73%	82,73%	56,36%
CLOSTRIDIUM	0,00%	78,00%	57,00%	62,00%

Tabla 10: Eficiencia de desinfección del método de electroporación para un caudal de 20 m³/h en función del tiempo de oxidación.

Observando de nuevo los rendimientos de desinfección: la eficacia de eliminación de *Escherichia coli* para ambos caudales (15 y 20 m³/h) pasa a ser del 100% independientemente del tiempo de oxidación que se deje posterior a la electroporación. Por otro lado, la desinfección de colifagos sigue en los valores anteriores: no aumenta su valor pese a dejar tiempo de oxidación. Por último, al dejar tiempo de oxidación, se consiguen mejores rendimientos de desinfección de esporas y de clostridium, siendo el caudal óptimo el de 20 m³/h; y el tiempo óptimo de 20 minutos para eliminar clostridium (llegando a eliminar el 78%) y de 40 minutos para eliminar esporas (pudiendo eliminar el 83%). De modo que lo que más nos interesaría en cuanto a eliminación de los microorganismos es tener un caudal de tratamiento elevado y un tiempo de oxidación medio, entre 20 y 40 minutos.

7.2. Estudio de la eficacia de aplicación de campos pulsados

Tras los excelentes resultados de desinfección obtenidos en los anteriores ensayos, se va a realizar un estudio de la eficacia del método en cuanto a la eliminación de la bacteria *Escherichia coli* y de coliformes totales cuando el campo eléctrico que se aplica no es continuo, sino que se aplica de manera pulsada en intervalos de tiempo. Además, se va a estudiar la cantidad de cloro libre que queda en el agua tras el tratamiento de electroporación con estos campos pulsados. Estos ensayos se van a realizar para caudales de 10 y de 15 m³/h.

A continuación, se incluyen dos tablas (Tablas 12 y 13) que contienen los tiempos de pulsado y de reposo acumulados, la dosis de intensidad acumulada y el consumo de



energía en función de la duración del pulso y del reposo; llegando a la conclusión de que el consumo de energía, y por tanto el ahorro de esta, es una función lineal respecto de la duración del reposo.

Los cálculos para obtener los resultados de las tablas se han realizado bajo las siguientes condiciones de trabajo:

Volumen reactor (m ³)	Vi	0,001943
Caudal tratamiento (m ³)	Qi	15
Tiempo paso (s)	Tp	0,46632
Duración del ciclo (ms)	Tc	100
Número de ciclos	Nc	4,6632
Corriente de trabajo (A)	Ct	66
Superficie anódica de trabajo (m ²)	Sat	0,33
Densidad de corriente (A/m ²)	Dc	200
Voltaje de trabajo medio (V)	Vm	15

Tabla 11: Condiciones de trabajo empleadas para las tablas de ahorro de energía.

El tiempo de pulsado acumulado (Tpa) se calcula de la siguiente manera:

$$Tpa = \frac{N^{\circ}ciclos \cdot Duración\ pulso}{1000}$$

Ecuación 3: Fórmula para calcular el tiempo de pulsado acumulado en segundos.

De la misma manera el tiempo de reposo acumulado (Tra) se calcula según la siguiente expresión:

$$Tra = \frac{N^{\circ}ciclos \cdot Duración\ reposo}{1000}$$

Ecuación 4: Fórmula para calcular el tiempo de reposo acumulado en segundos.

La dosis acumulada (Dac) se calcula con la siguiente fórmula:

$$Dac = Dc \cdot Tpa$$

Ecuación 5: Fórmula para calcular la dosis acumulada en A·s/m².

Donde Dc es la densidad de corriente en A/m² y Tpa corresponde al tiempo de pulsado acumulado en segundos.



El consumo de energía (P_m) se obtiene empleando la siguiente expresión:

$$P_m = \frac{V_m \cdot T_c \cdot T_{pa}}{Q_i}$$

Ecuación 6: Fórmula para calcular el consumo de energía.

Donde V_m es el voltaje de trabajo medio en Voltios, T_c es la duración del ciclo en milisegundos, T_{pa} es el tiempo de pulsado acumulado en segundos y Q_i es el caudal de tratamiento en m^3 .

Y, por último, el ahorro de energía en tanto por ciento se calcula con la siguiente expresión:

$$\text{Ahorro energía} = \frac{P_{m_{\text{sin reposo}}} - P_m}{P_{m_{\text{sin reposo}}}} \cdot 100$$

Ecuación 7: Fórmula para calcular el ahorro de energía en %.

Donde $P_{m_{\text{sin reposo}}}$ es la energía consumida cuando la duración del pulso es del 100% y P_m corresponde a la energía consumida en cada instante.

	Pulsado	100,00%	95,00%	90,00%	85,00%	80,00%	75,00%	70,00%	65,00%
	Reposo	0,00%	5,00%	10,00%	15,00%	20,00%	25,00%	30,00%	35,00%
Duración del pulso (ms)		100	95	90	85	80	75	70	65
Duración reposo (ms)		0	5	10	15	20	25	30	35
Tiempo pulsado acumulado (s)		0,46632	0,443004	0,419688	0,396372	0,373056	0,34974	0,326424	0,303108
Tiempo reposo acumulado (s)		0	0,023316	0,046632	0,069948	0,093264	0,11658	0,139896	0,163212
Dosis acumulada ($A \cdot s/m^2$)		93,264	88,6008	83,9376	79,2744	74,6112	69,948	65,2848	60,6216
Consumo energía ($W/h \cdot m^3$)		46,63	44,30	41,97	39,64	37,31	34,97	32,64	30,31
Ahorro de energía (%)		0	5	10	15	20	25	30	35

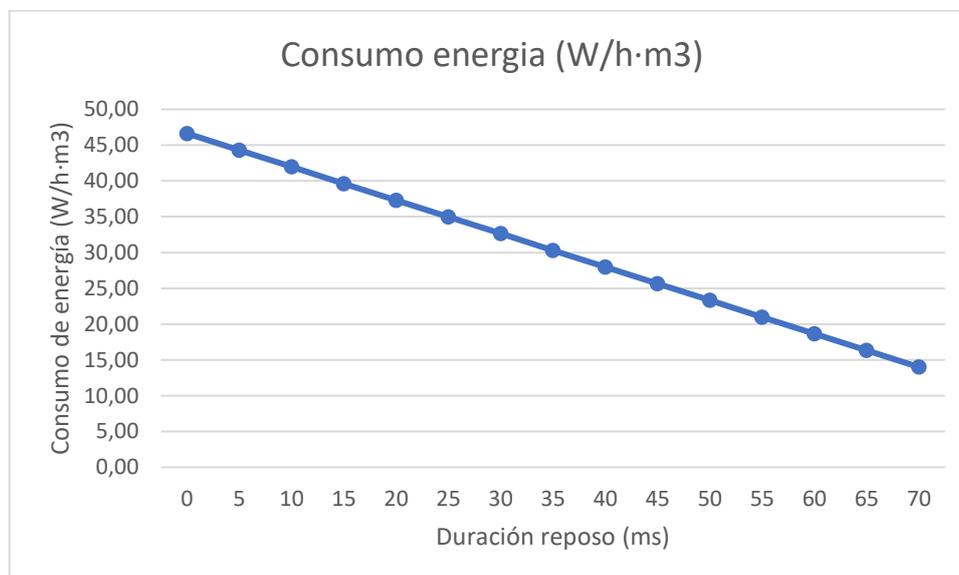
Tabla 12: Porcentajes de energía ahorrada en función de la duración del pulso.



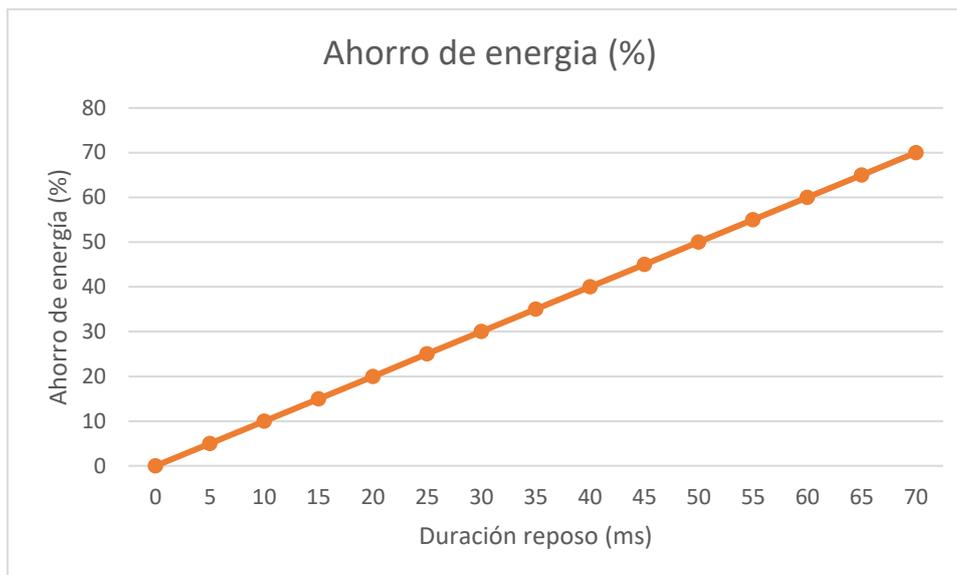
Pulsado	60,00%	55,00%	50,00%	45,00%	40,00%	35,00%	30,00%
Reposo	40,00%	45,00%	50,00%	55,00%	60,00%	65,00%	70,00%
Duración del pulso (ms)	60	55	50	45	40	35	30
Duración reposo (ms)	40	45	50	55	60	65	70
Tiempo pulsado acumulado (s)	0,279792	0,256476	0,23316	0,209844	0,186528	0,163212	0,139896
Tiempo reposo acumulado (s)	0,186528	0,209844	0,23316	0,256476	0,279792	0,303108	0,326424
Dosis acumulada (A·s/m ²)	55,9584	51,2952	46,632	41,9688	37,3056	32,6424	27,9792
Consumo energía (W/h·m ³)	27,98	25,65	23,32	20,98	18,65	16,32	13,99
Ahorro de energía (%)	40	45	50	55	60	65	70

Tabla 13: Continuación de porcentajes de energía ahorrada en función de la duración del pulso.

En las Gráficas 26 y 27 se representa respectivamente el consumo de energía del equipo y el ahorro de energía de este en función del tiempo de reposo del campo eléctrico sobre un pulso inicial de 100 milisegundos.



Gráfica 26: Consumo de energía en función del tiempo de reposo del campo eléctrico aplicado.



Gráfica 27: Ahorro de energía en función del tiempo de reposo.

A la vista de las dos gráficas, se observa que tanto el consumo de energía como el ahorro de energía varían de forma lineal según se va modificando la duración del tiempo de reposo; y en cuanto a la Gráfica 27 de ahorro de energía, se puede observar también que el ahorro de energía en tanto por ciento es equivalente a la duración del tiempo de reposo del campo, para un pulso inicial de 100 milisegundos.

En la Tabla 14 se recogen las concentraciones, en unidades/100 ml de agua problema, de *Escherichia coli* y coliformes a la entrada de la instalación.

	ENTRADA
<i>Escherichia coli</i>	18.000
Coliformes totales	100.000

Tabla 14: Concentraciones en unidades/100 ml a la entrada del equipo.

En las próximas tablas y gráficas se va a recoger el estudio de la concentración de cloro libre que queda en el agua tras su paso por los reactores y la eficacia de desinfección del equipo en cuanto a la eliminación de *Escherichia coli* y coliformes totales. Todo esto en función de una serie de parámetros que se irán variando y que son los siguientes: caudal y tiempo de paso, duración del ciclo, corriente de trabajo y densidad de corriente.



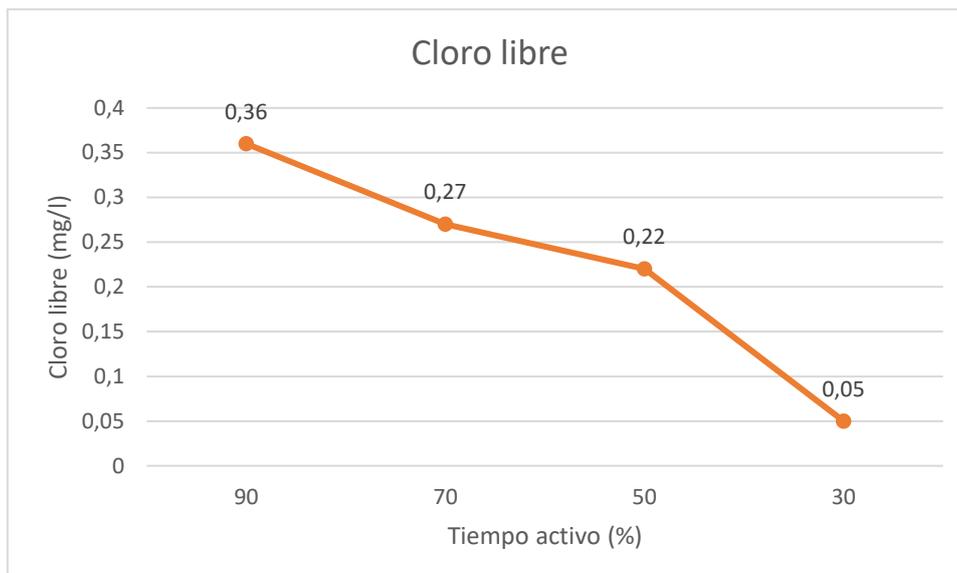
Para los primero veinte ensayos (P1 a P20) el caudal empleado es de 10 m³/h y el tiempo de paso de 864 ms. Y para los últimos diez (P20 a P30), el caudal empleado es de 15 m³/h y el tiempo de paso de 576 ms.

7.2.1. Estudio de rendimiento para caudal de 10 m³/h y duración del ciclo de 100 milisegundos

La *Tabla 15* recoge las concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales para una duración del ciclo de 100 ms, una corriente de trabajo de 100 A y una densidad de corriente de 303,03 A/m².

	P1	P2	P3	P4
Caudal de tratamiento (m ³ /h)	10	10	10	10
Tiempo de paso (ms)	864	864	864	864
Duración del ciclo (ms)	100	100	100	100
Tiempo activo (%)	90	70	50	30
Nº Ciclos	8,64	8,64	8,64	8,64
Corriente de trabajo (A)	100	100	100	100
Densidad de corriente (A/m ²)	303,03	303,03	303,03	303,03
Cloro libre (mg/l)	0,36	0,27	0,22	0,05
E coli (ufc/100 ml)	0	0	0	xxxx
Coliformes totales (ufc/100 ml)	0	2	120	xxxx

Tabla 15: Medidas de concentraciones de cloro libre, Escherichia coli y coliformes totales.



Gráfica 28: Concentración de cloro libre en mg/l en función del tiempo que está activo el campo eléctrico según las propiedades descritas.

A continuación, se calcula la eficacia de desinfección para *Escherichia coli* y coliformes mediante la aplicación de la siguiente *Ecuación 8*, obteniendo los siguientes resultados:

$$\% \text{ desinfección} = \frac{C_{\text{entrada}} - C_{\text{salida}}}{C_{\text{entrada}}} \cdot 100$$

Ecuación 8: Expresión para calcular el porcentaje de desinfección.

	P1	P2	P3	P4
Eficiencia desinfección E coli	100%	100%	100%	xxxx
Eficiencia desinfección coliformes	100%	99,998%	99,88%	xxxx

Tabla 16: Eficacia de desinfección de *Escherichia coli* y coliformes para las características de ensayo mencionadas.

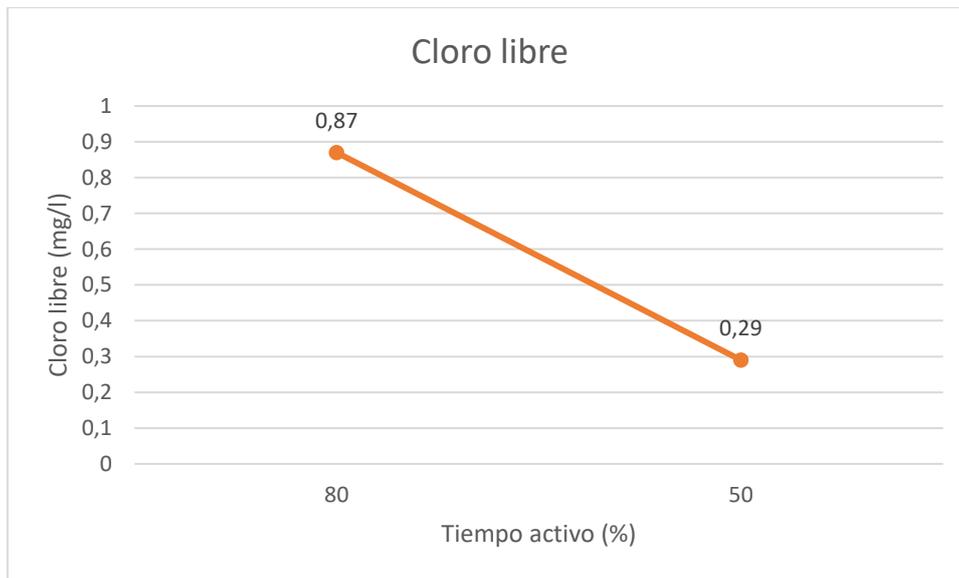
La *Tabla 17* recoge las concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales para una duración del ciclo de 100 ms, una corriente de trabajo de 83 A y una densidad de corriente de 251 A/m².

	P9	P10
Caudal de tratamiento (m ³ /h)	10	10
Tiempo de paso (ms)	864	864
Duración del ciclo (ms)	100	100



Tiempo activo (%)	80	50
Nº Ciclos	8,64	8,64
Corriente de trabajo (A)	83	83
Densidad de corriente (A/m ²)	251	251
Cloro libre (mg/l)	0,87	0,29
E coli (ufc/100 ml)	0	xxxx
Coliformes totales (ufc/100 ml)	0	xxxx

Tabla 17: Medidas de concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales.



Gráfica 29: Concentración de cloro libre en mg/l en función del tiempo que está activo el campo eléctrico según las propiedades descritas.

A continuación, se calcula la eficacia de desinfección para *Escherichia coli* y coliformes mediante la aplicación de la *Ecuación 8*, obteniendo los siguientes resultados:

	P9	P10
Eficiencia desinfección E coli	100%	xxxx
Eficiencia desinfección coliformes	100%	xxxx

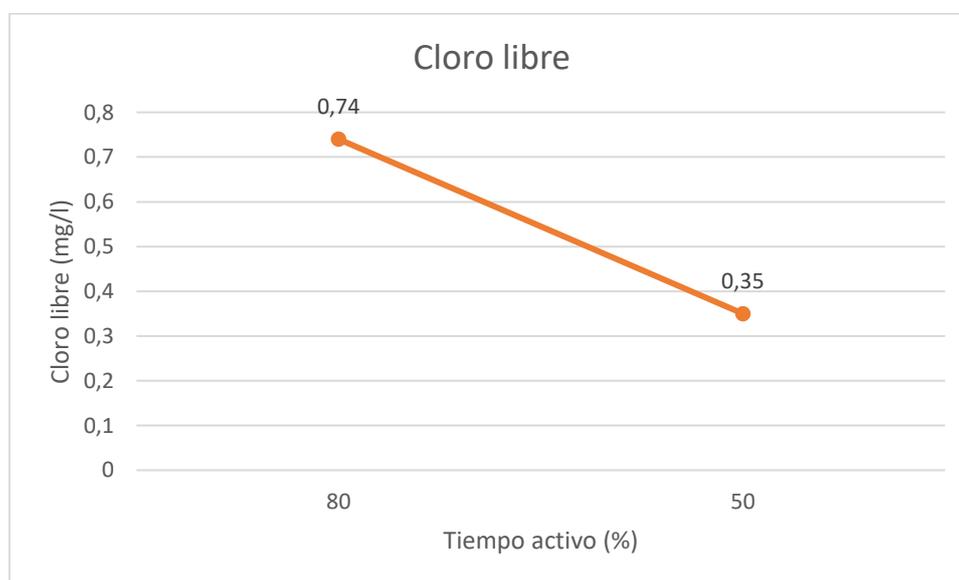
Tabla 18: Eficacia de desinfección de *Escherichia coli* y coliformes para las características de ensayo mencionadas.



La *Tabla 19* recoge las concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales para una duración del ciclo de 100 ms, una corriente de trabajo de 66 A y una densidad de corriente de 200 A/m².

	P15	P16
Caudal de tratamiento (m ³ /h)	10	10
Tiempo de paso (ms)	864	864
Duración del ciclo (ms)	100	100
Tiempo activo (%)	80	50
Nº Ciclos	8,64	8,64
Corriente de trabajo (A)	66	66
Densidad de corriente (A/m ²)	200	200
Cloro libre (mg/l)	0,74	0,35
E coli (ufc/100 ml)	0	14
Coliformes totales (ufc/100 ml)	26	xxxx

Tabla 19: Medidas de concentraciones de cloro libre, Escherichia coli y coliformes totales.



Gráfica 30: Concentración de cloro libre en mg/l en función del tiempo que está activo el campo eléctrico según las propiedades descritas.

A continuación, se calcula la eficacia de desinfección para *Escherichia coli* y coliformes mediante la aplicación de la *Ecuación 8*, obteniendo los siguientes resultados:



	P15	P16
Eficiencia desinfección E coli	100%	99,922%
Eficiencia desinfección coliformes	99,974%	xxxx

Tabla 20: Eficacia de desinfección de *Escherichia coli* y coliformes para las características de ensayo mencionadas.

Viendo los resultados del estudio de la concentración de cloro libre que queda en el agua tras su paso por los reactores y la eficacia de desinfección del equipo en cuanto a la eliminación de *Escherichia coli* y coliformes totales, todo esto para un caudal de 10 m³/h, un tiempo de paso de 864 ms, una duración del ciclo de 100 ms, y una corriente de trabajo y densidad de corriente variables, se aprecia como el porcentaje de desinfección es adecuado en todos los ensayos, estando comprendido en todos ellos entre el 99 y el 100% de desinfección. Paralelamente, conforme más tiempo está activo el campo, más concentración de cloro libre se mide; esto es lógico, ya que cuanto más tiempo activa esté la electroporación, mayor grado de desinfección tiene lugar, y añadiendo el mismo cloro te queda más cloro libre (sin combinar), ya que no tiene nada con lo que reaccionar. Resumiendo, cuanto más tiempo esté activa la electroporación, menos cloro hace falta para asegurar la desinfección. De modo que, en estos tres casos, viendo que el porcentaje de desinfección es adecuado sea cual sea el tiempo activo, el punto óptimo de trabajo será el que menos cloro libre deje en el agua, por lo tanto, para el ensayo de caudal 10 m³/h y duración del ciclo 100 ms, las condiciones óptimas de trabajo son una corriente de 100 A y una densidad de corriente de 303,03 A/m², con lo que se obtiene un cloro libre de 0,22 mg/l. También es interesante observar la pendiente de las rectas que se forman y ver cuál de ellas tiene mayor pendiente, lo que a la larga indicará que su concentración de cloro libre podrá ser menor a medida que se disminuya el tiempo de pulsado; mirándolo por este lado, el ensayo con condiciones de trabajo de corriente 83 A y densidad de corriente 251 A/m² será el que tenga mejor capacidad de disminuir su concentración de cloro libre a medida que se haga más pequeño el campo activo.

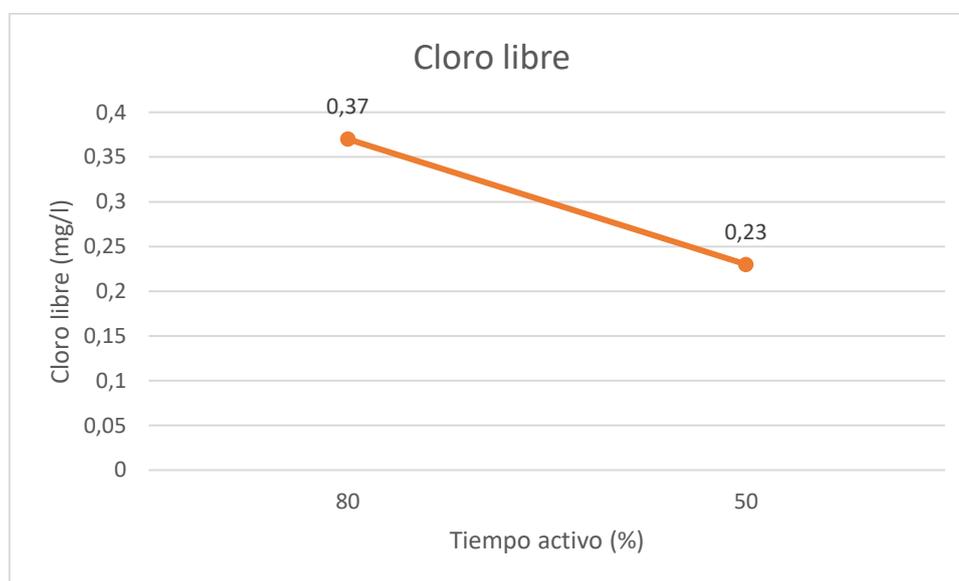


7.2.2. Estudio de rendimiento para caudal de 10 m³/h y duración del ciclo de 200 milisegundos

La *Tabla 21* recoge las concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales para una duración del ciclo de 200 ms, una corriente de trabajo de 100 A y una densidad de corriente de 303,03 A/m².

	P5	P6
Caudal de tratamiento (m ³ /h)	10	10
Tiempo de paso (ms)	864	864
Duración del ciclo (ms)	200	200
Tiempo activo (%)	80	50
Nº Ciclos	4,32	4,32
Corriente de trabajo (A)	100	100
Densidad de corriente (A/m ²)	303,03	303,03
Cloro libre (mg/l)	0,37	0,23
E coli (ufc/100 ml)	0	0
Coliformes totales (ufc/100 ml)	0	100

Tabla 21: Medidas de concentraciones de cloro libre, Escherichia coli y coliformes totales.



Gráfica 31: Concentración de cloro libre en mg/l en función del tiempo que está activo el campo eléctrico según las propiedades descritas.



A continuación, se calcula la eficacia de desinfección para *Escherichia coli* y coliformes mediante la aplicación de la *Ecuación 8*, obteniendo los siguientes resultados:

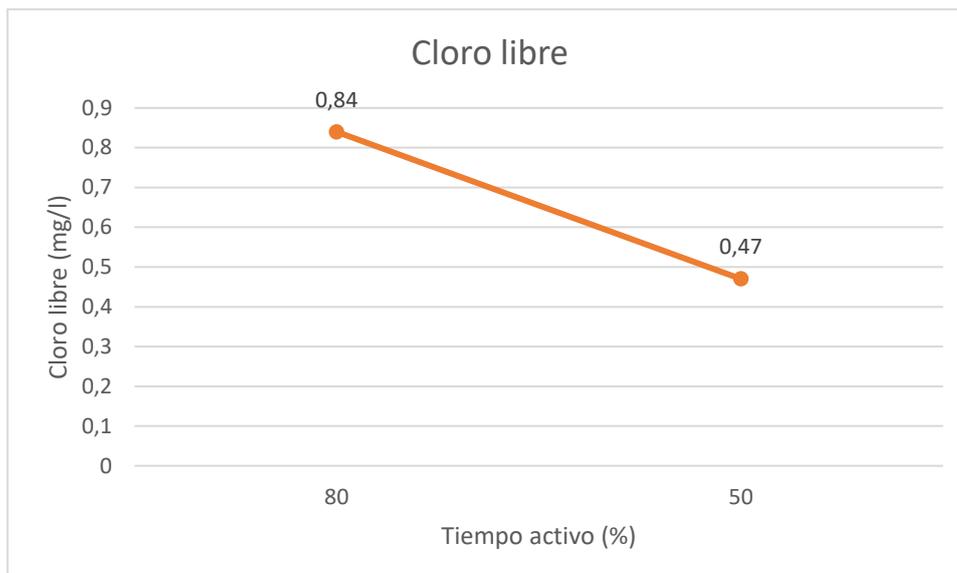
	P5	P6
Eficiencia desinfección E coli	100%	100%
Eficiencia desinfección coliformes	100%	99,90%

Tabla 22: Eficacia de desinfección de *Escherichia coli* y coliformes para las características de ensayo mencionadas.

La *Tabla 23* recoge las concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales para una duración del ciclo de 200 ms, una corriente de trabajo de 83 A y una densidad de corriente de 251 A/m².

	P11	P12
Caudal de tratamiento (m ³ /h)	10	10
Tiempo de paso (ms)	864	864
Duración del ciclo (ms)	200	200
Tiempo activo (%)	80	50
Nº Ciclos	4,32	4,32
Corriente de trabajo (A)	83	83
Densidad de corriente (A/m ²)	251	251
Cloro libre (mg/l)	0,84	0,47
E coli (ufc/100 ml)	0	0
Coliformes totales (ufc/100 ml)	1	31

Tabla 23: Medidas de concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales.



Gráfica 32: Concentración de cloro libre en mg/l en función del tiempo que está activo el campo eléctrico según las propiedades descritas.

A continuación, se calcula la eficacia de desinfección para *Escherichia coli* y coliformes mediante la aplicación de la *Ecuación 8*, obteniendo los siguientes resultados:

	P11	P12
Eficiencia desinfección E coli	100%	100%
Eficiencia desinfección coliformes	99,999%	99,969%

Tabla 24: Eficacia de desinfección de *Escherichia coli* y coliformes para las características de ensayo mencionadas.

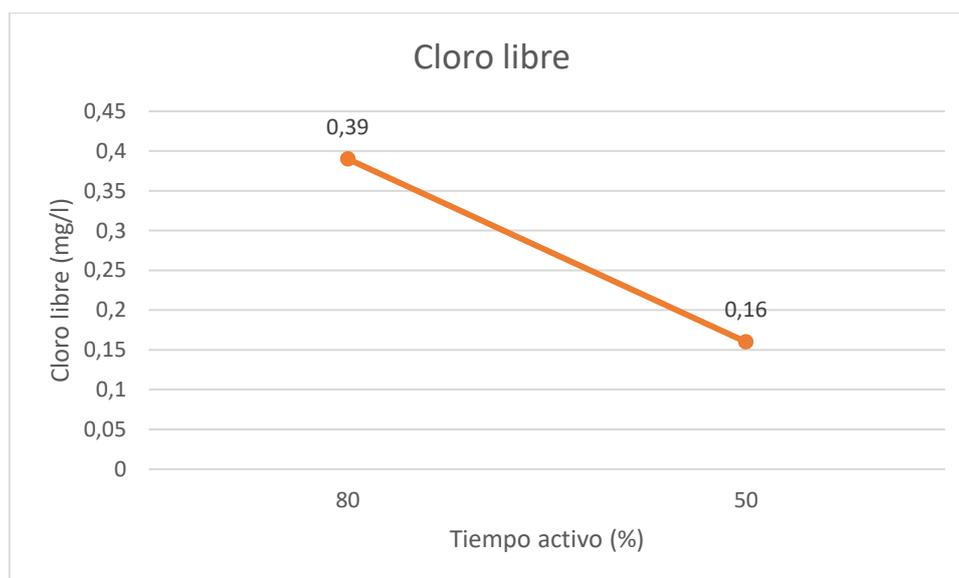
La *Tabla 25* recoge las concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales para una duración del ciclo de 200 ms, una corriente de trabajo de 66 A y una densidad de corriente de 200 A/m².

	P17	P18
Caudal de tratamiento (m ³ /h)	10	10
Tiempo de paso (ms)	864	864
Duración del ciclo (ms)	200	200
Tiempo activo (%)	80	50
Nº Ciclos	4,32	4,32
Corriente de trabajo (A)	66	66



Densidad de corriente (A/m ²)	200	200
Cloro libre (mg/l)	0,39	0,16
E coli (ufc/100 ml)	0	3
Coliformes totales (ufc/100 ml)	20	xxxx

Tabla 25: Medidas de concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales.



Gráfica 33: Concentración de cloro libre en mg/l en función del tiempo que está activo el campo eléctrico según las propiedades descritas.

A continuación, se calcula la eficacia de desinfección para *Escherichia coli* y coliformes mediante la aplicación de la *Ecuación 8*, obteniendo los siguientes resultados:

	P17	P18
Eficiencia desinfección E coli	100%	99,983%
Eficiencia desinfección coliformes	99,98%	xxxx

Tabla 26: Eficacia de desinfección de *Escherichia coli* y coliformes para las características de ensayo mencionadas.

Viendo los resultados del estudio de la concentración de cloro libre que queda en el agua tras su paso por los reactores y la eficacia de desinfección del equipo en cuanto a la eliminación de *Escherichia coli* y coliformes totales, todo esto para un caudal de 10 m³/h, un tiempo de paso de 864 ms, una duración del ciclo de 200 ms, y una corriente de trabajo y densidad de corriente variables, se aprecia como el porcentaje de desinfección es adecuado en todos los ensayos, estando comprendido en todos ellos



entre el 99 y el 100% de desinfección. Paralelamente, conforme más tiempo está activo el campo, más concentración de cloro libre se mide; esto es lógico, ya que cuanto más tiempo activa esté la electroporación, mayor grado de desinfección tiene lugar, y añadiendo el mismo cloro te queda más cloro libre (sin combinar), ya que no tiene nada con lo que reaccionar. Resumiendo, cuanto más tiempo esté activa la electroporación, menos cloro hace falta para asegurar la desinfección. De modo que, en estos tres casos, viendo que el porcentaje de desinfección es adecuado sea cual sea el tiempo activo, el punto óptimo de trabajo será el que menos cloro libre deje en el agua, por lo tanto, para el ensayo de caudal 10 m³/h y duración del ciclo 200 ms, las condiciones óptimas de trabajo son una corriente de 66 A y una densidad de corriente de 200 A/m², con lo que se obtiene un cloro libre de 0,16 mg/l. También es interesante observar la pendiente de las rectas que se forman y ver cuál de ellas tiene mayor pendiente, lo que a la larga indicará que su concentración de cloro libre podrá ser menor a medida que se disminuya el tiempo de pulsado; mirándolo por este lado, el ensayo con las condiciones de trabajo anteriores será el que tenga mejor capacidad de disminuir su concentración de cloro libre a medida que se haga más pequeño el campo activo.

7.2.3. Estudio de rendimiento para caudal de 10 m³/h y duración del ciclo de 300 milisegundos

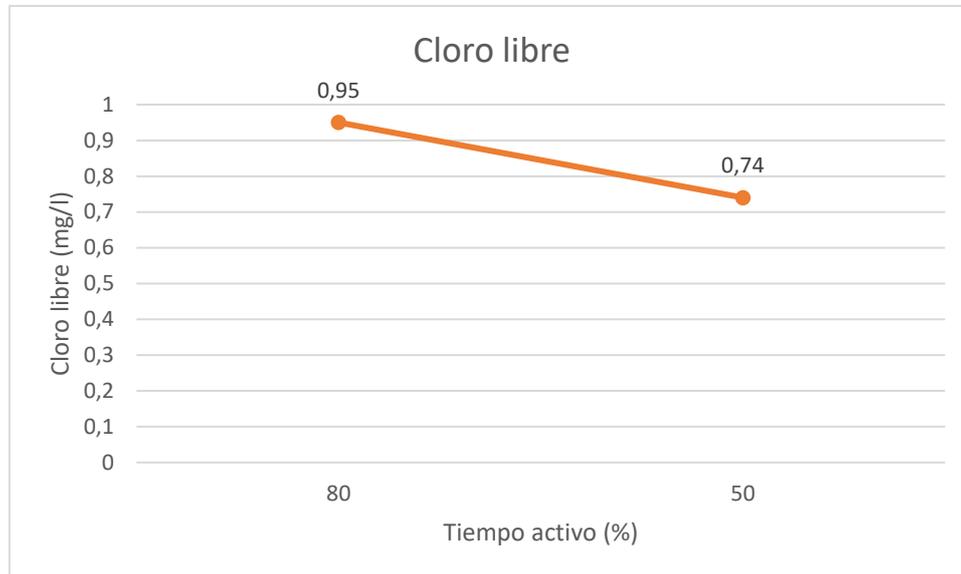
La *Tabla 27* recoge las concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales para una duración del ciclo de 300 ms, una corriente de trabajo de 100 A y una densidad de corriente de 303,03 A/m².

	P7	P8
Caudal de tratamiento (m ³ /h)	10	10
Tiempo de paso (ms)	864	864
Duración del ciclo (ms)	300	300
Tiempo activo (%)	80	50
Nº Ciclos	2,88	2,88
Corriente de trabajo (A)	100	100
Densidad de corriente (A/m ²)	303,03	303,03
Cloro libre (mg/l)	0,95	0,74
E coli (ufc/100 ml)	0	0



Coliformes totales (ufc/100 ml)	0	3
---------------------------------	---	---

Tabla 27: Medidas de concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales.



Gráfica 34: Concentración de cloro libre en mg/l en función del tiempo que está activo el campo eléctrico según las propiedades descritas.

A continuación, se calcula la eficacia de desinfección para *Escherichia coli* y coliformes mediante la aplicación de la *Ecuación 8*, obteniendo los siguientes resultados:

	P7	P8
Eficiencia desinfección E coli	100%	100%
Eficiencia desinfección coliformes	100%	99,997%

Tabla 28: Eficacia de desinfección de *Escherichia coli* y coliformes para las características de ensayo mencionadas.

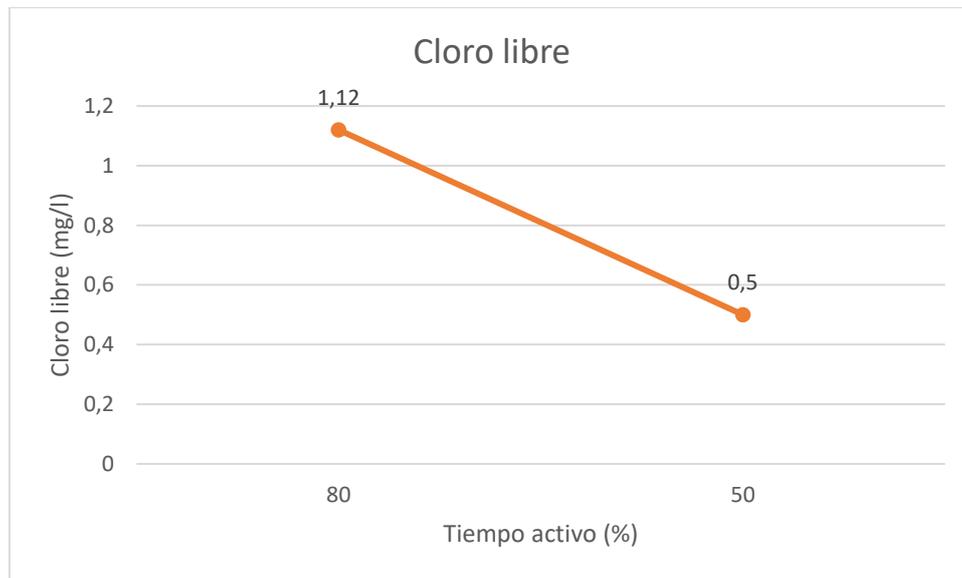
La *Tabla 29* recoge las concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales para una duración del ciclo de 300 ms, una corriente de trabajo de 83 A y una densidad de corriente de 251 A/m².

	P13	P14
Caudal de tratamiento (m ³ /h)	10	10
Tiempo de paso (ms)	864	864
Duración del ciclo (ms)	300	300



Tiempo activo (%)	80	50
Nº Ciclos	2,88	2,88
Corriente de trabajo (A)	83	83
Densidad de corriente (A/m ²)	251	251
Cloro libre (mg/l)	1,12	0,5
E coli (ufc/100 ml)	0	1
Coliformes totales (ufc/100 ml)	5	77

Tabla 29: Medidas de concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales.



Gráfica 35: Concentración de cloro libre en mg/l en función del tiempo que está activo el campo eléctrico según las propiedades descritas.

A continuación, se calcula la eficacia de desinfección para *Escherichia coli* y coliformes mediante la aplicación de la *Ecuación 8*, obteniendo los siguientes resultados:

	P13	P14
Eficiencia desinfección E coli	100%	99,994%
Eficiencia desinfección coliformes	99,995%	99,923%

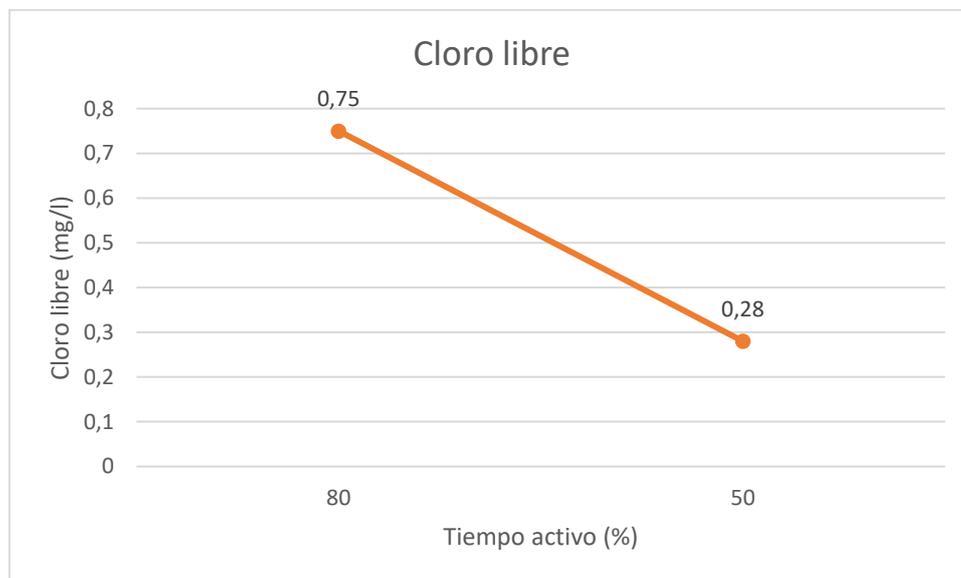
Tabla 30: Eficacia de desinfección de *Escherichia coli* y coliformes para las características de ensayo mencionadas.



La *Tabla 31* recoge las concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales para una duración del ciclo de 300 ms, una corriente de trabajo de 66 A y una densidad de corriente de 200 A/m².

	P19	P20
Caudal de tratamiento (m ³ /h)	10	10
Tiempo de paso (ms)	864	864
Duración del ciclo (ms)	300	300
Tiempo activo (%)	80	50
Nº Ciclos	2,88	2,88
Corriente de trabajo (A)	66	66
Densidad de corriente (A/m ²)	200	200
Cloro libre (mg/l)	0,75	0,28
E coli (ufc/100 ml)	0	0
Coliformes totales (ufc/100 ml)	8	50

Tabla 31: Medidas de concentraciones de cloro libre, Escherichia coli y coliformes totales.



Gráfica 36: Concentración de cloro libre en mg/l en función del tiempo que está activo el campo eléctrico según las propiedades descritas.

A continuación, se calcula la eficacia de desinfección para *Escherichia coli* y coliformes mediante la aplicación de la *Ecuación 8*, obteniendo los siguientes resultados:



	P19	P20
Eficiencia desinfección E coli	100%	100%
Eficiencia desinfección coliformes	99,992%	99,95%

Tabla 32: Eficacia de desinfección de *Escherichia coli* y coliformes para las características de ensayo mencionadas.

Viendo los resultados del estudio de la concentración de cloro libre que queda en el agua tras su paso por los reactores y la eficacia de desinfección del equipo en cuanto a la eliminación de *Escherichia coli* y coliformes totales, todo esto para un caudal de 10 m³/h, un tiempo de paso de 864 ms, una duración del ciclo de 300 ms, y una corriente de trabajo y densidad de corriente variables, se aprecia como el porcentaje de desinfección es adecuado en todos los ensayos, estando comprendido en todos ellos entre el 99 y el 100% de desinfección. Paralelamente, conforme más tiempo está activo el campo, más concentración de cloro libre se mide; esto es lógico, ya que cuanto más tiempo activa esté la electroporación, mayor grado de desinfección tiene lugar, y añadiendo el mismo cloro te queda más cloro libre (sin combinar), ya que no tiene nada con lo que reaccionar. Resumiendo, cuanto más tiempo esté activa la electroporación, menos cloro hace falta para asegurar la desinfección. De modo que, en estos tres casos, viendo que el porcentaje de desinfección es adecuado sea cual sea el tiempo activo, el punto óptimo de trabajo será el que menos cloro libre deje en el agua, por lo tanto, para el ensayo de caudal 10 m³/h y duración del ciclo 300 ms, las condiciones óptimas de trabajo son una corriente de 66 A y una densidad de corriente de 200 A/m², con lo que se obtiene un cloro libre de 0,28 mg/l. También es interesante observar la pendiente de las rectas que se forman y ver cuál de ellas tiene mayor pendiente, lo que a la larga indicará que su concentración de cloro libre podrá ser menor a medida que se disminuya el tiempo de pulsado; mirándolo por este lado, el ensayo con las condiciones de trabajo anteriores será el que tenga mejor capacidad de disminuir su concentración de cloro libre a medida que se haga más pequeño el campo activo.

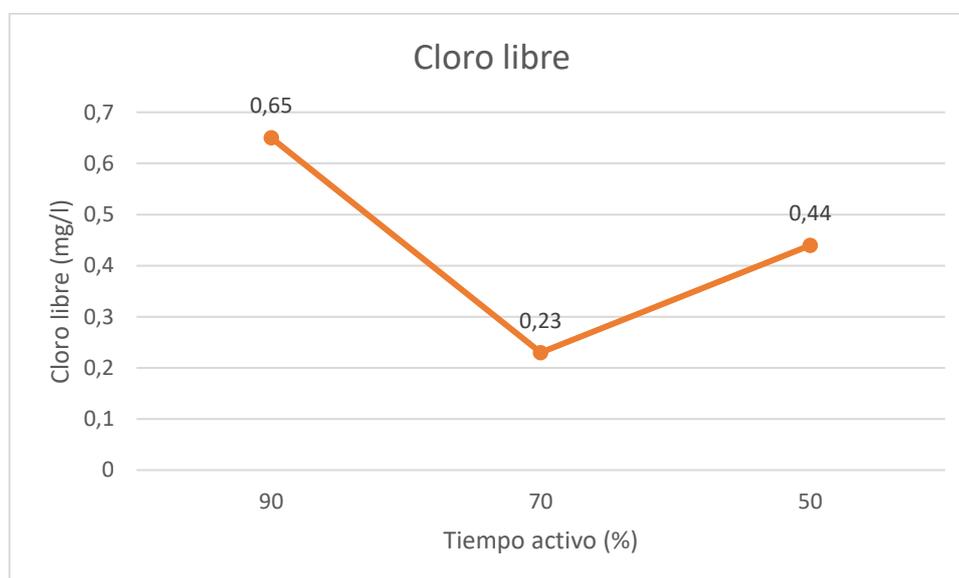


7.2.4. Estudio de rendimiento para caudal de 15 m³/h y duración del ciclo de 100 milisegundos

La *Tabla 33* recoge las concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales para una duración del ciclo de 100 ms, una corriente de trabajo de 100 A y una densidad de corriente de 303,03 A/m².

	P21	P22	P23
Caudal de tratamiento (m ³ /h)	15	15	15
Tiempo de paso (ms)	576	576	576
Duración del ciclo (ms)	100	100	100
Tiempo activo (%)	90	70	50
Nº Ciclos	5,76	5,76	5,76
Corriente de trabajo (A)	100	100	100
Densidad de corriente (A/m ²)	303,03	303,03	303,03
Cloro libre (mg/l)	0,65	0,23	0,44
E coli (ufc/100 ml)	0	0	xxxx
Coliformes totales (ufc/100 ml)	12	xxxx	xxxx

Tabla 33: Medidas de concentraciones de cloro libre, Escherichia coli y coliformes totales.



Gráfica 37: Concentración de cloro libre en mg/l en función del tiempo que está activo el campo eléctrico según las propiedades descritas.

A continuación, se calcula la eficacia de desinfección para *Escherichia coli* y coliformes mediante la aplicación de la *Ecuación 8*, obteniendo los siguientes resultados:



	P21	P22	P23	P24
Eficiencia desinfección E coli	100%	100%	xxxx	xxxx
Eficiencia desinfección coliformes	99,988%	xxxx	xxxx	xxxx

Tabla 34: Eficacia de desinfección de Escherichia coli y coliformes para las características de ensayo mencionadas.

Viendo los resultados del estudio de la concentración de cloro libre que queda en el agua tras su paso por los reactores y la eficacia de desinfección del equipo en cuanto a la eliminación de *Escherichia coli* y coliformes totales, todo esto para un caudal de 15 m³/h, un tiempo de paso de 576 ms, una duración del ciclo de 100 ms, y una corriente de trabajo y densidad de corriente variables, se aprecia como el porcentaje de desinfección es adecuado en todos los ensayos, estando comprendido en todos ellos entre el 99 y el 100% de desinfección. Paralelamente, conforme más tiempo está activo el campo, más concentración de cloro libre se debería medir; esto es lógico, ya que cuanto más tiempo activa esté la electroporación, mayor grado de desinfección tiene lugar, y añadiendo el mismo cloro te queda más cloro libre (sin combinar), ya que no tiene nada con lo que reaccionar. Resumiendo, cuanto más tiempo esté activa la electroporación, menos cloro hace falta para asegurar la desinfección. De modo que, en este caso, viendo que el porcentaje de desinfección es adecuado sea cual sea el tiempo activo, el punto óptimo de trabajo debería ser el de menos tiempo de campo activo, ya que debería ser el de menor concentración de cloro libre. Sin embargo, viendo la gráfica se observa que no es así, esto puede deberse a algún error a la hora de medir las concentraciones.

7.2.5. Estudio de rendimiento para caudal de 15 m³/h y duración del ciclo de 200 milisegundos

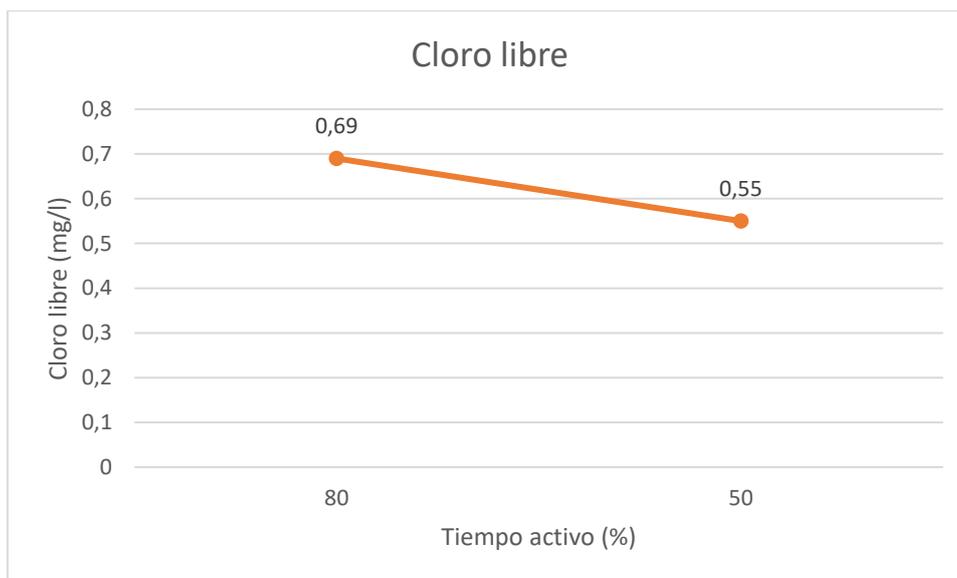
La *Tabla 35* recoge las concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales para una duración del ciclo de 200 ms, una corriente de trabajo de 100 A y una densidad de corriente de 303,03 A/m².

	P25	P26
Caudal de tratamiento (m ³ /h)	15	15
Tiempo de paso (ms)	576	576
Duración del ciclo (ms)	200	200



Tiempo activo (%)	80	50
Nº Ciclos	2,88	2,88
Corriente de trabajo (A)	100	100
Densidad de corriente (A/m ²)	303,03	303,03
Cloro libre (mg/l)	0,69	0,55
E coli (ufc/100 ml)	0	0
Coliformes totales (ufc/100 ml)	0	25

Tabla 35: Medidas de concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales.



Gráfica 38: Concentración de cloro libre en mg/l en función del tiempo que está activo el campo eléctrico según las propiedades descritas.

A continuación, se calcula la eficacia de desinfección para *Escherichia coli* y coliformes mediante la aplicación de la Ecuación 8, obteniendo los siguientes resultados:

	P25	P26
Eficiencia desinfección E coli	100%	100%
Eficiencia desinfección coliformes	100%	99,975%

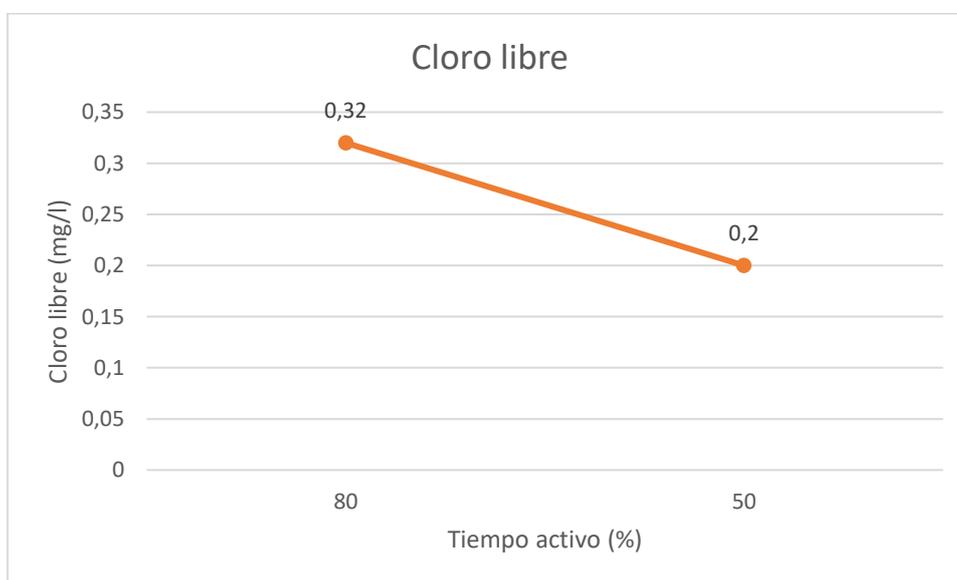
Tabla 36: Eficacia de desinfección de *Escherichia coli* y coliformes para las características de ensayo mencionadas.

La Tabla 37 recoge las concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales para una duración del ciclo de 200 ms, una corriente de trabajo de 83 A y una densidad de corriente de 251 A/m².



	P27	P28
Caudal de tratamiento (m ³ /h)	15	15
Tiempo de paso (ms)	576	576
Duración del ciclo (ms)	200	200
Tiempo activo (%)	80	50
Nº Ciclos	2,88	2,88
Corriente de trabajo (A)	83	83
Densidad de corriente (A/m ²)	251	251
Cloro libre (mg/l)	0,32	0,2
E coli (ufc/100 ml)	0	29
Coliformes totales (ufc/100 ml)	26	xxxx

Tabla 37: Medidas de concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales.



Gráfica 39: Concentración de cloro libre en mg/l en función del tiempo que está activo el campo eléctrico según las propiedades descritas.

A continuación, se calcula la eficacia de desinfección para *Escherichia coli* y coliformes mediante la aplicación de la Ecuación 8, obteniendo los siguientes resultados:

	P27	P28
Eficiencia desinfección E coli	100%	99,839%
Eficiencia desinfección coliformes	99,974%	xxxx

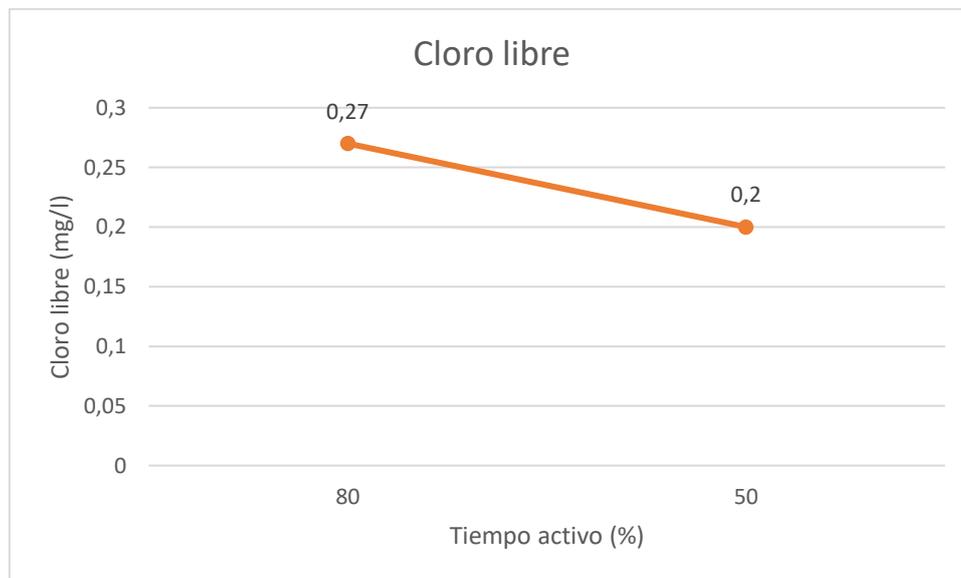
Tabla 38: Eficacia de desinfección de *Escherichia coli* y coliformes para las características de ensayo mencionadas.



La *Tabla 39* recoge las concentraciones de cloro libre, *Escherichia coli* y coliformes totales para una duración del ciclo de 200 ms, una corriente de trabajo de 66 A y una densidad de corriente de 200 A/m².

	P29	P30
Caudal de tratamiento (m ³ /h)	15	15
Tiempo de paso (ms)	576	576
Duración del ciclo (ms)	200	200
Tiempo activo (%)	80	50
Nº Ciclos	2,88	2,88
Corriente de trabajo (A)	66	66
Densidad de corriente (A/m ²)	200	200
Cloro libre (mg/l)	0,27	0,2
E coli (ufc/100 ml)	2	xxxx
Coliformes totales (ufc/100 ml)	xxxx	xxxx

Tabla 39: Medidas de concentraciones de cloro libre, Escherichia coli y coliformes totales.



Gráfica 40: Concentración de cloro libre en mg/l en función del tiempo que está activo el campo eléctrico según las propiedades descritas.

A continuación, se calcula la eficacia de desinfección para *Escherichia coli* y coliformes mediante la aplicación de la *Ecuación 8*, obteniendo los siguientes resultados:

	P29	P30
Eficiencia desinfección E coli	99,989%	xxxx



Eficiencia desinfección coliformes	xxxx	xxxx
------------------------------------	------	------

Tabla 40: Eficacia de desinfección de *Escherichia coli* y coliformes para las características de ensayo mencionadas.

Viendo los resultados del estudio de la concentración de cloro libre que queda en el agua tras su paso por los reactores y la eficacia de desinfección del equipo en cuanto a la eliminación de *Escherichia coli* y coliformes totales, todo esto para un caudal de 15 m³/h, un tiempo de paso de 576 ms, una duración del ciclo de 200 ms, y una corriente de trabajo y densidad de corriente variables, se aprecia como el porcentaje de desinfección es adecuado en todos los ensayos, estando comprendido en todos ellos entre el 99 y el 100% de desinfección. Paralelamente, conforme más tiempo está activo el campo, más concentración de cloro libre se mide; esto es lógico, ya que cuanto más tiempo activa esté la electroporación, mayor grado de desinfección tiene lugar, y añadiendo el mismo cloro te queda más cloro libre (sin combinar), ya que no tiene nada con lo que reaccionar. Resumiendo, cuanto más tiempo esté activa la electroporación, menos cloro hace falta para asegurar la desinfección. De modo que, en estos tres casos, viendo que el porcentaje de desinfección es adecuado sea cual sea el tiempo activo, el punto óptimo de trabajo será el que menos cloro libre deje en el agua, por lo tanto, para el ensayo de caudal 15 m³/h y duración del ciclo 200 ms, las condiciones óptimas de trabajo son una corriente de 83 A y una densidad de corriente de 251 A/m², con lo que se obtiene un cloro libre de 0,2 mg/l. También es interesante observar la pendiente de las rectas que se forman y ver cuál de ellas tiene mayor pendiente, lo que a la larga indicará que su concentración de cloro libre podrá ser menor a medida que se disminuya el tiempo de pulsado; mirándolo por este lado, el ensayo con las condiciones de trabajo anteriores será el que tenga mejor capacidad de disminuir su concentración de cloro libre a medida que se haga más pequeño el campo activo.

7.3. Estudio de reducción de la Legionella

La *Legionella pneumophila* es un tipo de bacteria que se encuentra de forma natural en ambientes de agua fresca, como lagos y arroyos. El problema viene cuando se multiplica y propaga por los sistemas de agua artificiales, ya que se puede convertir en un problema para la salud causando la legionela o legionelosis. Esta enfermedad



presenta dos formas diferenciadas: por un lado, la infección pulmonar, que se caracteriza por ser una neumonía con fiebre alta; y por otro, la fiebre de Pontiac, con síntomas parecidos a los de la gripe.

La multiplicación de esta bacteria se produce mayoritariamente en instalaciones mal diseñadas que favorecen el estancamiento del agua y la acumulación de nutrientes de la bacteria formando una biocapa, como podrían ser, por ejemplo, plantas de depuración de aguas residuales.

Para este último ensayo, para un caudal de 15 m³/h se ha realizado un estudio sobre la eficacia del método en cuanto a la eliminación de la Legionella. Para ello se ha medido la concentración de esta a la entrada y a la salida de las celdas inmediatamente después del proceso de electroporación y tras una hora de espera, una vez que el cloro generado de forma natural en la electroporación ya ha ejercido su capacidad de oxidación.

Se han obtenido los siguientes resultados:

Entrada	Salida EP (T= 0 h)	Salida EP+OX (T=1 h)
27600	62400	31
5400	6300	68
0	8500	37
22000	50400	0
1780	8900	0
67857	90000	0
54358	80328	469

Tabla 41: Medidas de concentraciones de Legionella en unidades/100 ml a la entrada, a la salida y pasada una hora desde su salida de los reactores, para un caudal de 15 m³/h.

En la *Tabla 42* se aprecia claramente como los valores de concentración de Legionella (obtenidos con la *Ecuación 9*) aumentan tras pasar el agua por las celdas y sufrir la electroporación, estos resultados a primera vista pueden resultar extraños ya que puede no entenderse cómo aumenta la concentración de esta bacteria si el agua está siendo sometida a un proceso de desinfección. La explicación es que gran parte de esta bacteria se encuentra en el interior de unas esporas cuya membrana se destruye en el proceso



de electroporación, y es entonces cuando la Legionella se libera de la espora y provoca ese aumento de su concentración.

$$\% \text{ desinfección} = - \frac{C_{\text{entrada}} - C_{\text{salida (T=0)}}}{C_{\text{entrada}}} \cdot 100$$

Ecuación 9: Expresión para calcular el aumento de concentración entre entrada y salida sin oxidación.

Aumento de concentración de Legionella entre entrada y salida
126,09%
16,67%
-
129,09%
400,00%
32,63%
47,78%

Tabla 42: Porcentaje de aumento de concentración de Legionella entre la entrada y la salida (T=0 h) de los reactores.

A continuación, se incluyen dos tablas que muestran la eficacia de desinfección (obtenidas con las *Ecuaciones 10 y 11*) de los procesos de electroporación y de oxidación respecto a la entrada al equipo (antes de que la concentración aumente debido a la rotura de las membranas de las esporas) y respecto a la salida del equipo (una vez las esporas han sido destruidas por el efecto de la electroporación).

$$\% \text{ desinfección} = \frac{C_{\text{entrada}} - C_{\text{salida (T=1)}}}{C_{\text{entrada}}} \cdot 100$$

Ecuación 10: Expresión para calcular la eficacia de desinfección de Legionella entre entrada y salida tras oxidación.

Reducción desinfección EP+OX respecto a la entrada
99,89%
98,74%



-
100,00%
100,00%
100,00%
99,14%

Tabla 43: Eficacia de desinfección de la electroporación y una hora de oxidación respecto a la entrada de los reactores.

$$\% \text{ desinfección} = \frac{C_{\text{salida}}(T=0) - C_{\text{salida}}(T=1)}{C_{\text{salida}}(T=0)} \cdot 100$$

Ecuación 11: Expresión para calcular la eficacia de desinfección de Legionella entre salida sin oxidación y salida tras oxidación.

Reducción desinfección EP+OX respecto a la salida (T=0 h)
99,95%
98,92%
99,56%
100,00%
100,00%
100,00%
99,42%

Tabla 44: Eficacia de desinfección de la electroporación y una hora de oxidación respecto a la salida de los reactores sin oxidación.

Viendo ambas tablas, se puede decir que el rendimiento de desinfección es adecuado en ambas situaciones, ya sea comparando la salida tras oxidación con la entrada, como comparándola salida tras oxidación con la salida a tiempo cero. En todos los casos el rendimiento está por encima o roza el 99% de desinfección, siendo obviamente ligeramente mayor cuando se hace con los valores de concentración a la salida que con los valores a la entrada.



8. Conclusiones

8.1. Conclusión estudio general del método de electroporación

En cuanto al estudio de la eficacia de desinfección del método de electroporación aislado y del método de electroporación combinado con el proceso de oxidación para la eliminación de ciertos microorganismos nocivos para la salud humana intentando a la vez evitar la formación excesiva de subproductos no deseados, se ha llegado a la conclusión de que para evitar la formación de subproductos no deseados, la mayoría de ellos procedentes del cloro, el tratamiento óptimo para casi todos los casos es realizar la desinfección con caudales de agua elevados ($20 \text{ m}^3/\text{h}$ en nuestro caso) sin dejar tiempo de oxidación tras la electroporación, ya que en muchos de los casos al dejar este tiempo para que se produzca la oxidación, la cantidad de subproductos presentes en el agua a tratar aumenta. Por otro lado, en cuanto al deseo de eliminar ciertos microorganismos perjudiciales para el ser humano, se ha observado que el mejor método de desinfección es tratar caudales elevados de agua (para nosotros $20 \text{ m}^3/\text{h}$) y dejar un tiempo de oxidación medio, entre 20 y 40 minutos de espera dependiendo del microorganismo que se desee eliminar con mejor eficacia. De modo que, para conseguir un equilibrio entre poder de desinfección elevado sin generar un exceso de subproductos, se concluye que las condiciones óptimas de tratamiento son trabajar con caudales altos y tiempos de oxidación bajos (en torno a 20 minutos).

8.2. Conclusión estudio de aplicación de campos pulsados

Recopilando las conclusiones sacadas del estudio de la concentración de cloro libre y la eficacia de desinfección del equipo en función del caudal y tiempo de paso, duración del ciclo, corriente de trabajo y densidad de corriente, se aprecia como el porcentaje de desinfección es adecuado en todos los ensayos, estando comprendido en todos ellos entre el 99 y el 100% de desinfección. A su vez, conforme más tiempo está activo el campo, más concentración de cloro libre se mide; esto es lógico, ya que cuanto más tiempo activa esté la electroporación, mayor grado de desinfección tiene lugar, y añadiendo el mismo cloro te queda más cloro libre (sin combinar), ya que no tiene nada con lo que reaccionar. De modo que, cuanto más tiempo esté activa la electroporación,



menos cloro hace falta para asegurar la desinfección, y esto es mejor ya que consigues un agua con menos olor y sabor, menos toxicidad y menos gasto de reactivos químicos. Con lo que concluimos que, para cada caudal y duración del ciclo de los ensayos, viendo que el porcentaje de desinfección es adecuado sea cual sea el tiempo activo, el punto de condiciones óptimas de corriente de trabajo y densidad de corriente será el que menos cloro libre deje en el agua, que coincide con el de menor tiempo de campo activo.

8.3. Conclusión estudio de reducción de la Legionella

Por último, en relación al estudio sobre el rendimiento de eliminación de Legionella, se observa lo comentado anteriormente, y es que, al ser sometida el agua al proceso de electroporación aislado, la concentración de Legionella crece bruscamente debido a la rotura de las membranas de ciertas esporas que contienen la bacteria, con lo que esta bacteria es liberada al agua residual. A pesar de esto, cuando se deja un tiempo de una hora para que el cloro generado de forma natural durante la electroporación ejerza su potencial de oxidación, se observa una reducción extraordinaria de la concentración de esta bacteria en el agua, rozando en casi todos los casos el 100% de desinfección, ya sea comparando la salida tras electroporación y oxidación con la entrada a los reactores o con la salida tras electroporación únicamente.

9. Referencias bibliográficas

<http://geodesic-i.com/>

<https://dle.rae.es/infectar?m=form>

PATENTE: "Sistema de desinfección de agua por electroporación"

<https://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/desinfeccion5.pdf>

Transparencias de ingeniería medioambiental

<https://es.slideshare.net/renzodaviddelacruz/oxidacin-de-materia>

<https://www.cdc.gov/legionella/about/history-sp.html>



<https://www.cdc.gov/legionella/about/causes-transmission-sp.html>

<https://cuidateplus.marca.com/enfermedades/infecciosas/legionella.html>

<https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>

Vicente García, J.C., 2012, *Técnicas de descontaminación. Limpieza. Desinfección. Esterilización*, España, Paraninfo.

Hernández Muñoz, A., 2015, *Depuración y desinfección de aguas residuales*, España, Garceta Grupo Editorial.

García-Villanova, R.J., 2016, *Subproductos de desinfección-cloración del agua*, España, Amarante.

Leveau, J.Y. y Bouix, M., 2002, *Manual técnico de higiene, limpieza y desinfección*, Madrid, España, Antonio Madrid Vicente.

10. Anexo

10.1. Relación con objetivos de desarrollo sostenible

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) se adoptaron en 2015 por los Estados Miembros como un llamado universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad para 2030. Son 17 y están integrados entre ellos, ya que reconocen que las intervenciones en un área afectarán a los resultados de otras y que el desarrollo debe equilibrar la sostenibilidad medio ambiental, económica y social.

Para alcanzar estos ambiciosos objetivos es necesaria la colaboración de todo el mundo; se necesita la creatividad, el conocimiento, la tecnología y los recursos financieros de toda la sociedad para conseguir los ODS en cada contexto.

Los ODS que más se relacionan con este trabajo de investigación son, principalmente, el objetivo número 6: agua limpia y saneamiento; el número 11: ciudades y comunidades sostenibles; y, en menor medida, el número 15: vida de ecosistemas



terrestres. A continuación, se va a proceder a explicar en qué consiste cada uno de estos objetivos y ver en qué modo están relacionados con este trabajo.

En cuanto al sexto ODS, agua limpia y saneamiento, según el programa de las Naciones Unidas para el desarrollo (PNUD) la escasez de agua es un problema para más del 40% de la población mundial y esta cifra no hará más que crecer debido al aumento de la temperatura causado por el cambio climático; el aumento de las sequías y la desertificación no hace otra cosa que aumentar esta tendencia. Cuando llegemos al año 2050 se estima que al menos una de cada cuatro personas sufrirá esta escasez de agua. Según datos del PNUD el 80% de las aguas residuales se vierten en aguas superficiales fluviales sin ser expuestas a un tratamiento adecuado. Para revertir esta situación es necesario invertir en la infraestructura y proporcionar las instalaciones sanitarias adecuadas, y aquí es donde entra el sistema desarrollado por Geodesic Innovations, que tiene, entre otros muchos, el objetivo de desinfectar efluentes de agua residual para su posterior vertido al medioambiente.

Hablando ahora del objetivo que recalca la importancia de que las ciudades y las comunidades sean sostenibles, según datos del PNUD actualmente más de la mitad de la población mundial vive en zonas urbanas (concretamente 4,5 mil millones de personas) y para el año 2050 se espera que esta cifra alcance los 6,5 mil millones de personas, en otras palabras, dos tercios de la población mundial. Según el PNUD, en las próximas décadas, el 90% del crecimiento urbano tendrá lugar en países en vías de desarrollo. Esta expansión incontrolada de las urbes, como resultado del crecimiento de la población y de la migración a las ciudades, hace que sea necesario un plan de desarrollo para garantizar la seguridad y la sostenibilidad de estas ciudades. Para alcanzar esta sostenibilidad que se menciona, es necesario un tratamiento de los residuos, en los que entra el agua residual, ya que, si no se gestionan bien los mismos, sobre todo en países en vías de desarrollo, se podrán producir brotes de enfermedades, problemas de higiene y destrucción de áreas verdes, entre otros problemas, que acabarán provocando el colapso de estas urbes.

Y por último el objetivo número 15, que trata de la importancia de la vida de los ecosistemas terrestres. Este ODS está muy relacionado con el número 14 (vida



submarina) ya que los vertidos de aguas residuales se producen tanto en el medio edáfico como en aguas superficiales, como por ejemplo ríos y océanos, provocando la destrucción de estos con las consecuencias que eso conlleva. Todo el mundo sabe que la vida humana necesita tanto los recursos terrestres como los recursos oceánicos para su sustento; el medio terrestre en concreto provee a la humanidad del 80% de su alimentación, además de proveer hábitats a millones de especies y ser una fuente importante de aire y agua limpias. Por estas razones se deben tomar medidas urgentes para reducir la pérdida de los ecosistemas naturales y de la biodiversidad que nos proporcionan alimentos y agua seguros a nivel mundial. De nuevo, gracias al sistema de desinfección desarrollado por Geodesic, se logrará, de manera más eficiente que mediante los métodos tradicionales, evitar el deterioro de la vida terrestre y submarina provocado por el vertido de efluentes residuales.