

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**DESINFECCIÓN CATÓDICA DE AGUAS DE CONSUMO HUMANO  
MEDIANTE LA PRODUCCIÓN DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> UTILIZANDO UN  
ELECTRODO DE GRAFITO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
MAGISTER EN AMBIENTAL**

**ING. WILBER ELIAS GUAMÁN SALAZAR**  
wilberelias@yahoo.com

**DIRECTOR: DR. PATRICIO JAVIER ESPINOZA MONTERO**  
patricio.espinoza@epn.edu.ec

**CODIRECTOR: ING. LUIS A. JARAMILLO SÁNCHEZ**  
luis.jaramillo@epn.edu.ec

**Quito, marzo 2017**

## DECLARACIÓN

Yo, Wilber Elías Guamán Salazar declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Wilber Elías Guamán Salazar

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente proyecto fue desarrollado por Wilber Elías Guamán Salazar, bajo nuestra supervisión.

---

Dr. Patricio Javier Espinoza Montero  
Director

---

Ing. Luis A. Jaramillo Sánchez  
Codirector

## AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos al Centro de Investigación y Control Ambiental (CICAM) que es parte de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental (FICA) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), a su Directora de Calidad y Técnica Ing. Carola Fierro, y a todo el personal que labora en este prestigioso centro, por su valiosa ayuda y colaboración tanto técnica como científica.

Al Ing. Luis Jaramillo por su apoyo para la aprobación y desarrollo de este proyecto de investigación.

Al Dr. Patricio Espinoza por compartir sus conocimientos, experiencias y espíritu de investigación lo que ha incrementado mi curiosidad e interés por esta área fascinante de la Química denominada “**electroquímica**”.

## CONTENIDO

RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
PRESENTACIÓN	xiii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 ALCANCE	3
1.2 HIPÓTESIS	5
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	7
2.1 MICROBIOLOGÍA EN EL AGUA DE CONSUMO	7
2.1.1 <i>ESCHERICHIA-COLI</i>	7
2.2 ESTRATEGIAS DE IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN MICROBIOLÓGICA	9
2.2.1 DETERMINACIÓN DE LA POBLACIÓN BACTERIANA POR TUBOS MÚLTIPLES O NÚMERO MAS PROBABLE (NMP)	9
2.2.2 CUANTIFICACIÓN DE MICROORGANISMOS POR CONTEO	10
2.3 NORMATIVA MICROBIOLÓGICA APLICABLE AL AGUA DE CONSUMO HUMANO	10
2.4 MÉTODOS DE DESINFECCIÓN DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO	11
2.4.1 CLORACIÓN	11
2.4.2 OZONIZACIÓN	12
2.4.3 RADICACIÓN ULTRAVIOLETA	13
2.4.4 PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POAs)	16
2.5 ELECTROQUÍMICA	18
2.5.1 TIPOS DE ELECTRODOS	18
2.5.1.1 ELECTRODO DE TRABAJO Y CONTRAELECTRODO	18
2.5.1.2 ELECTRODO DE REFERENCIA	18
2.5.2 CELDAS ELECTROQUÍMICAS	19
2.5.3 VOLTAMPEROMETRÍA	20

2.5.4 CINÉTICA DEL PROCESO EMPLEANDO ELECTRODO DE DISCO ROTATORIO	22
2.5.5 ELECTROGENERACIÓN DE H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	24
2.5.6 EFICIENCIA DE LA GENERACIÓN	25
2.5.7 POTENCIA ELÉCTRICA	26
2.6 DESINFECCIÓN ELECTROQUÍMICA	26
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS	29
3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL	29
3.2 ANÁLISIS ANALÍTICO	30
3.3 PROCEDIMIENTOS	32
3.3.1 SELECCIÓN DE ELECTRODOS	32
3.3.2 VOLTAMPEROMETRÍA	32
3.3.3 CINÉTICA DEL PROCESO	34
3.3.3.1 GENERACIÓN DE DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS CINÉTICOS	34
3.3.3.2 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS CINÉTICOS DE LA REACCIÓN DE REDUCCIÓN DE O <sub>2</sub> A H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	35
3.3.4 PERMANGANOMETRÍA DE REFERENCIA	36
3.3.4 GENERACIÓN DE H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> EN CELDA TIPO BATCH	37
3.3.6 GENERACIÓN DE H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> EN CELDA TIPO H	38
3.3.6.1 PROCEDIMIENTO PARA LA GENERACIÓN DE H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> EN LA CELDA TIPO H	40
3.3.7 PRUEBAS BIOLÓGICAS	41
3.3.7.1 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO INICIAL DE BACTERIAS	41
3.3.7.2 PRUEBA DE SOBREVIVENCIA DE BACTERIAS EN EL AGUA NO TRATADA	43
3.3.7.3 PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	45
3.3.7.4 PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON RADIACIÓN UV-C	46
3.3.7.5 PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Y RADIACIÓN UV COMBINADOS	47
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	49
4.1 ANÁLISIS DE ELECTRODOS Y CONTRAELECTRODOS	49
4.2. VOLTAMETRÍAS DIFERENTES MEDIOS DE TRABAJO	52

4.3 CINÉTICA DEL PROCESO	55
4.3.1 VOLTAMPEROMETRÍA CÍCLICA Y DE BARRIDO LINEAL CON ELECTRODO DE DISCO ROTATORIO	55
4.3.2 APLICACIÓN DE LA RELACIÓN DE KOUTECKY-LEVICH	57
4.3.3 APLICACIÓN DE LA RELACIÓN DE TAFEL	58
4.4 GENERACIÓN DE H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> EN CELDA SIMPLE	60
4.5 GENERACIÓN DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO EN CELDA H	63
4.6 RENDIMIENTO DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	66
4.7 RESULTADO DE LAS PRUEBAS BIOLÓGICAS	67
4.7.1 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD INICIAL DE BACTERIAS	67
4.7.2 PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	68
4.7.3 PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON RADIACIÓN UV-C	69
4.7.4 PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Y RADIACIÓN UV-C.	70
4.8 CONSUMO ENERGÉTICO	73
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
5.1 CONCLUSIONES	75
5.2 RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	78
ANEXOS	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1: PARTES PRINCIPALES DE UNA BACTERIA <i>E. COLI</i>	7
FIGURA 2.2: MEMBRANA CELULAR COMPUESTA POR FOSFOLÍPIDOS, ENZIMAS Y OTROS	8
FIGURA 2.3: ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y SU ABSORCIÓN POR LA BACTERIA <i>E. COLI</i>	14
FIGURA 2.4: CLASIFICACIÓN DE LOS POAs	17
FIGURA 2.5: CELDA ELECTROLÍTICA SIMPLE Y TIPO H	19
FIGURA 2.6: VOLTAMPEROMETRÍA CÍCLICA DE UNA SOLUCIÓN SATURADA CON AIRE	21
FIGURA 2.7: ELECTRODO DE DISCO ROTATORIO	23
FIGURA 2.8: CURVAS DE SOBREVIVENCIA DE LA BACTERIA <i>E. COLI</i>	28
FIGURA 3.1: ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA A SEGUIR EN EL PROYECTO	30
FIGURA 3.2: DISCO ROTATORIO ACOPLADO A UN POTENCIOSTATO Y UN ORDENADOR	34
FIGURA 3.3: VOLUMEN DE $\text{KMnO}_4$ vs. CONCENTRACIÓN DE $\text{H}_2\text{O}_2$	36
FIGURA 3.1: DISPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS PARA LA GENERACIÓN DE $\text{H}_2\text{O}_2$ EN CELDA SIMPLE	37
FIGURA 3.5: CONSTRUCCIÓN DE MEMBRANA PERMEABLE PARA CELDA TIPO H	39
FIGURA 3.6: EQUIPO UTILIZADO EN LA GENERACIÓN DE $\text{H}_2\text{O}_2$ EN CELDA TIPO H	41
FIGURA 3.7: DILUCIONES EN SERIE DE BACTERIAS	42
FIGURA 3.8: PROCEDIMIENTO DE DILUCIÓN PARA DETERMINAR EL NÚMERO INICIAL DE BACTERIAS	42
FIGURA 3.9: SOBREVIVENCIA DE BACTERIAS EN AGUA NO TRATADA	44
FIGURA 3.10: PROCEDIMIENTO PARA LA PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON $\text{H}_2\text{O}_2$	45
FIGURA 3.112: PROCEDIMIENTO PARA LA PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON RADIACIÓN UV-c	47



FIGURA 3.123: EQUIPOS Y PROCEDIMIENTO UTILIZADO PARA LA PRUEBA COMBINADA UV-c + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	48
FIGURA 4.1: ELECTRODOS Y CONTRAELECTRODOS	49
FIGURA 4.2: VOLTAMETRÍAS CÍCLICAS DE ELECTRODOS Y CONTRAELECTRODOS EN HNO <sub>3</sub> 0.2 M	51
FIGURA 4.3: VOLTAMETRÍAS CÍCLICAS DE HNO <sub>3</sub> CON N <sub>2</sub> Y CON AIRE.	52
FIGURA 4.4: VOLTAMETRÍAS CÍCLICAS PARA DISTINTOS MEDIOS	53
FIGURA 4.5: VOLTAMETRÍAS CÍCLICAS DE TODOS LOS MEDIOS	54
FIGURA 4.6: VOLTAMETRÍAS CÍCLICAS DEL AGUA NO TRATADA	55
FIGURA 4.7: VOLTAMETRÍAS DE BARRIDO LINEAL PARA DIFERENTES MEDIOS	56
FIGURA 4.8: $\omega^{-1/2}$ vs. $I_l^{-1}$ ( $E^*_{-1}$ A $E^*_{301}$ )	57
FIGURA 4.9: LINEALIZACIÓN ENTRE $\eta$ Y $\text{Log } j_k$	59
FIGURA 4.10: CURVAS DE GENERACIÓN DE H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> EN VARIOS MEDIOS	61
FIGURA 4.11: CONSECUENCIAS DE POTENCIALES SUPERIORES A 1000 mV	62
FIGURA 4.12: GENERACIÓN DE H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> EN CELDA TIPO H	63
FIGURA 4.134: CONCENTRACIÓN DE H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> GENERADO EN CELDA TIPO H	64
FIGURA 4.145: CURVAS DE GENERACIÓN DE H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> EN CELDA SIMPLE Y EN TIPO H	65
FIGURA 4.156: EFICIENCIA DE LA PRODUCCIÓN DE H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	66
FIGURA 4.167: DETERMINACIÓN DEL NÚMERO INICIAL DE BACTERIAS	67
FIGURA 4.178: RESULTADO DE LA PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .	69
FIGURA 4.189: RESULTADO DE LA PRUEBA CON RADIACIÓN UV-c	69
FIGURA 4.1910: RESULTADOS DE LA PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + UV-c	71

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1: POAs UTILIZADOS EN LA ELIMINACIÓN DE PATÓGENOS	28
TABLA 3.1: PARÁMETROS DE REFERENCIA PARA INICIAR LAS VOLTAMETRÍAS CÍCLICAS	33
TABLA 3.2: RANGO DE VOLTAJES DE TRABAJO PARA CADA MEDIO	34
TABLA 4.1: RESISTENCIA ELÉCTRICA DE ELECTRODOS Y CONTRAELECTRODOS	50
TABLA 4.2: PARÁMETROS CINÉTICOS	59
TABLA 4.3: PARÁMETROS DE GENERACIÓN PARA CADA MEDIO	61
TABLA 4.4: CARACTERIZACIÓN DEL AGUA ANTES Y DESPUÉS DE LA GENERACIÓN DE H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	65

## RESUMEN

En este proyecto de investigación, orientado a aplicarse en comunidades que no tienen acceso al agua potable, se llevó a cabo un estudio de la desinfección de agua contaminada con *Ecoli* y coliformes fecales, empleando un proceso de oxidación avanzada, con el objetivo de encontrar una alternativa que sustituya a la cloración y a los efectos nocivos que se dan en presencia de materia orgánica.

Para la generación de peróxido de hidrógeno *in situ*, se requirió una celda electroquímica que utilizó como cátodo un electrodo de grafito. Antes de iniciar con la producción de  $H_2O_2$ , se buscó el potencial catódico adecuado mediante voltamperometría cíclica. Además, se realizó un estudio de los parámetros cinéticos de la reacción de reducción de  $O_2$  a  $H_2O_2$  en grafito utilizando un electrodo de disco rotatorio. Posteriormente, se procedió a escalar la producción galvanostática de  $H_2O_2$  en una celda tipo H con compartimentos separados, utilizando como separador una membrana de *agarosa* y cloruro de potasio. Como ánodo para cerrar el circuito se empleó acero inoxidable del tipo AISI 300. En el proyecto se estudió, el efecto del potencial y la corriente en la generación de  $H_2O_2$  en agua no tratada. Además, este estudio contempló la evaluación del efecto de iluminar el  $H_2O_2$  electrogenerado con una lámpara UV-c en agua entubada inoculada con bacterias.

Como resultado, se tuvo que en la celda simple se generó  $13 \text{ mg L}^{-1}$  de  $H_2O_2$ , en 300 minutos a un voltaje de 1.3 V (vs. Ag/AgCl) y una corriente de 13.6 mA, mientras que en la celda tipo H se obtuvo  $41 \text{ mg L}^{-1}$  de  $H_2O_2$  en 240 minutos a un voltaje de 0.8 V (vs. Ag/AgCl) con una corriente de 6.2 mA. El valor del  $H_2O_2$  generado en el primer tipo de celda es alrededor del 30% del generado en la celda tipo H. Para determinar la efectividad del proceso de desinfección, se realizaron pruebas microbiológicas empleando *Ecoli* y coliformes fecales; como desinfectantes  $H_2O_2$ , radiación UV-c y la combinación de estas.

Finalmente, se comprobó que con  $41 \text{ mg L}^{-1}$  de  $H_2O_2$  electrogenerado y radiación ultravioleta simultáneamente aplicada, se logra la desinfección. Se tiene, un proceso seguro, de un costo relativamente bajo y amigable con el ambiente.

## ABSTRACT

At present the treatment that is used in the disinfection of clear waters for human consumption, is the chlorination, which eliminates a large number of microorganisms by oxidation, and its action can be prolonged for several hours. However, it has been observed that the use of chlorine as a disinfectant in the presence of aromatic organic compounds can generate chlorophenols, chloroamines or chloroform. These compounds are known as substances detrimental to human health, it is even well known that many of these are carcinogenic. Therefore, it is necessary to search for safer and environmentally friendly disinfection methods, such as advanced oxidation processes using  $H_2O_2$  in the presence of UV radiation, which allows the generation of two hydroxyl radicals ( $\cdot OH$ ) for each molecule of  $H_2O_2$ .

In this research project it is proposed to use  $H_2O_2$  electro generated in situ in an electrolytic cell for the disinfection of microorganisms present in water. It has been taken as the representative microorganism present in the water to *Escherichia-Coli* (*E. coli*) on which the respective tests will be performed.

## PRESENTACIÓN

En la actualidad el tratamiento que se emplea en la desinfección de aguas claras para consumo humano, es la cloración, la misma que elimina un gran número de microorganismos por oxidación, y su acción se la puede prolongar por varias horas. Sin embargo, se ha observado que el uso del cloro como desinfectante en presencia de compuestos orgánicos aromáticos puede generar clorofenoles, cloroaminas o cloroformo. Estos compuestos son conocidos como sustancias perjudiciales para la salud humana, incluso es muy bien conocido que muchos de estos son cancerígenos. Por lo que, es necesario la búsqueda de métodos de desinfección más seguros y ambientalmente amigables, como es el caso de los procesos de oxidación avanzada utilizando  $H_2O_2$  en presencia de radiación UV, lo cual permite generar dos radicales hidroxilos ( $\cdot OH$ ) por cada molécula de  $H_2O_2$ .

En este proyecto de investigación se propone utilizar  $H_2O_2$  electro generado *in situ* en una celda electrolítica para la desinfección de microorganismos presentes en agua. Se ha tomado como microorganismo representativo presente en el agua a la *Escherichia-Coli* (*E. coli*) sobre la que se realizarán las respectivas pruebas.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

La última etapa que se lleva a cabo en todo proceso de potabilización del agua es la desinfección. Sin embargo, en muchos lugares sobre todo en las comunidades rurales del país, no se realiza ningún tipo de tratamiento o si lo hay es una actividad deficiente, ya sea por falta de personal, infraestructura o presupuestos para la construcción y el mantenimiento de las plantas de tratamiento, lo que genera un problema de salud pública por las enfermedades de carácter parasitario que se pueden contraer (Alva y Morales, 2012), (CONAGUA, 2007).

Un método frecuentemente empleado para la eliminación de patógenos es la cloración del agua. Las razones para utilizar la cloración son: un bajo costo de alrededor de 213000 litros por dólar (MSPAS, 2006), (ISA, 2017), y que elimina a la mayor parte de microorganismos presentes Anexo No 1. Además, idealmente mantiene su acción durante 72 horas (Campoverde Barros, 2015), sin embargo, una pobre o excesiva dosificación podría causar inconvenientes como la deficiente eliminación de los patógenos o en su defecto una sobre cloración que puede producir efectos adversos a largo plazo como enfermedades de alto riesgo como el cáncer de hígado, estomago, riñón, colon, (Ayala T. y Pacheco E., 2013) y en ancianos acidosis metabólica hiperclorémica, vasoconstricción renal, entre otras (Herrera Rodríguez, 2012). Por otra parte, se hace indispensable anteponer otros tratamientos al agua antes de la cloración, de forma que se eliminen los compuestos orgánicos, esto en muchos casos sale del control de los encargados. La incapacidad de eliminar los compuestos orgánicos del agua a tratar, tratada o que se transporta hasta el destino final es el causante de la generación de cloroformo, clorofenoles y cloraminas que son perjudiciales para la salud humana (Villanueva *et al.*, 2001), siendo algunas de ellas mutagénicas (OMS, 2006), otros cancerígenos (Ma *et al.*, 2011) , (Castro de Esparza,

1992) y pueden causar problemas en el desarrollo de neonatos (Villanueva *et al.*, 2001).

Si bien existen varios procesos electroquímicos bien conocidos como son: la electrocoagulación (Martínez Navarro, 2007) , óxido – reducción con electrodos de Pt, PbO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>, y recientemente los de diamante dopados con boro (Linares *et al.*, 2011) , para el tratamiento de aguas contaminadas con materia orgánica e inorgánica, se conoce poco sobre la desinfección de microorganismos existentes en agua de consumo humano cuando se tiene una generación *in situ*. El H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es un oxidante fuerte que tiene la capacidad de romper la membrana celular de la mayoría de las bacterias (por oxidación) y desnaturalizar la composición de los virus (Cantoni *et al.*, 1988). Además, el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en presencia de radiación se rompe hemolíticamente y genera dos moléculas de <sup>•</sup>OH, este proceso es mucho mejor en pH alcalino y a longitudes de onda de 254 nm (Domènech *et al.*, 2001), (Muñoz Peña, 2016). Es por ello que, en el presente trabajo de investigación se propone estudiar la generación electroquímica de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, mediante la reacción de reducción de O<sub>2</sub> en medio ácido, neutro y alcalino. Posterior a esto, con el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> generado se realizarán pruebas de desinfección de aguas contaminadas con *Escherichia-Coli* en presencia y ausencia de radiación UV-vis. Con este procedimiento se pretende implementar una metodología más barata de desinfección de aguas contaminadas con *Escherichia-Coli*, sin la necesidad de comprar, transportar y almacenar el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, así como evitando el uso la cloración.

La bibliografía muestra que investigaciones en el área hacen posible la eliminación de patógenos con la generación de peróxido de hidrógeno y radicales <sup>•</sup>OH, sin embargo, estas se las realiza empleando equipos y medios que podrían resultar inalcanzables a nivel práctico como son los electrodos dopados con boro, por los altos costos o por la inaplicabilidad del método. Con este antecedente en el presente estudio se empleará electrodos de grafico comercial de fácil adquisición y reposición de ser el caso. Los resultados posteriormente se podrán escalar a nivel de prototipo, donde se estudiará la factibilidad técnica – económica de implementación en una planta de desinfección.

El estudio que se desarrolla a continuación pretende aportar con una investigación a profundidad sobre la desinfección catódica de aguas de consumo humano, identificar los parámetros y encontrar las condiciones más favorables para la producción de  $H_2O_2$ ; compuesto químico que tiene muchas aplicaciones de ingeniería, sobre todo en el área de alimentos, medicina, textil, papel, entre otras.

## 1.1 ALCANCE

A continuación, se presentan los puntos que fundamentan la investigación:

- El uso de  $H_2O_2$  permite evitar la formación de sustancias peligrosas que se pueden generar con el empleo de cloro. Se sabe que compuestos indeseables producto de la cloración (materia orgánica e inorgánica + cloro) son perjudiciales para la salud humana, incluso se conoce que muchos de estos son mutagénicos (OMS, 2006) y/o cancerígenos (Ma *et al.*, 2011), (Castro de Esparza, 1992). Además, pueden producir defectos de nacimiento en neonatos (Villanueva *et al.*, 2001), problemas gastrointestinales, y a largo plazo producir anemia y metahemoglobinemia (Caíres, *et al.*, 2010).
- El proceso de desinfección electroquímico se puede aplicar en lugares en los que no existe ningún tipo de tratamiento para el agua. El presente estudio, pretende dar una alternativa para la desinfección del agua de consumo humano, sobre todo se orienta a lugares en donde se complica la práctica de una cloración eficiente por falta de personal técnico o por la no existencia de la misma. El empleo de métodos electroquímicos para generar peróxido de hidrógeno como principal componente de la desinfección fue complementada con el análisis de la aplicación de un campo eléctrico de bajo potencial como aporte complementario a la inhibición de microorganismos.



- Como ventaja se tiene que el  $H_2O_2$  posee un amplio espectro de desinfección y eliminación de patógenos, al 3% es bacteriostático y al 6% bactericida a temperatura ambiente. Los tipos de microorganismos inhibidos son esporas, bacterias, hongos, virus como el VIH (Argerich González *et al.*, s.f.).
- No se generan residuos peligrosos en la producción del peróxido de hidrógeno. Es importante observar que los residuos peligrosos como las sustancias alquitranosas (Esteban y Pelle Blanc, 2013) que se generan con los métodos tradicionales, el transporte de sustancias químicas propias de los procesos de desinfección (Qiang *et al.*, 2002) desde el lugar de generación hasta el punto de aplicación desaparecen con la electrogeneración.
- Método versátil que se puede acoplar a otros procesos como son los procesos de desinfección utilizando: cloración, UV,  $O_3$  y ultrasonido. La versatilidad del método electroquímico de desinfección propuesto permite complementarlo con otros procesos como es la radiación ultravioleta, la ozonización, el ultrasonido (Osorio *et al.*, 2010). También se puede complementar el proceso de desinfección con un aporte de cloro para que cumpla el papel de cloro residual, es decir, mantener el agua desinfectada mientras se transporta hacia los hogares.
- La desinfección con el  $H_2O_2$  electrogenerado es un método amigable con el ambiente debido a que presenta varias ventajas en comparación con otros métodos, entre ellas tenemos:
  - a) Reducido consumo de energía, pues la potencia eléctrica empleada es relativamente baja en el intervalo de 0.06 a 1.1 KW-h por 100 litros de agua tratada.
  - b) No genera productos contaminantes como las cloraminas y sustancias organocloradas.

- c) Infraestructura sencilla con elementos de costo relativamente bajos, de fácil adquisición y reposición.

## 1.2 HIPÓTESIS

Es posible desinfectar aguas contaminadas con *Escherichia-Coli* utilizando H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> electrogenerado a escala de laboratorio en presencia y ausencia de luz UV-c.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar la producción electroquímica de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> que emplea un electrodo de grafito como cátodo, mediante el análisis de la cinética del proceso y un escalamiento de la generación, para aplicarla en la desinfección de aguas de consumo humano contaminadas con *Escherichia-Coli* a escala preparativa.

### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar un método de desinfección amigable con el ambiente, aplicando procesos de oxidación avanzada para proponer una alternativa a la cloración del agua y sus efectos nocivos que se generan en presencia de materia orgánica.
- Determinar a microescala los parámetros cinéticos de la reacción de reducción de O<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, analizando los procesos en medio ácido, neutro y alcalino, para establecer la factibilidad de escalarla.
- Poner a punto la producción catódica de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en una celda tipo H con una barra de grafito, a través de un estudio del efecto del potencial y la densidad de corriente

en medio ácido, neutro y alcalino, para determinar las mejores condiciones de generación.

- Probar la desinfección de agua contaminada con *Escherichia-Coli* y coliformes fecales, utilizando el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> electrogenerado en las mejores condiciones de producción previamente encontradas, con el fin de verificar si la cantidad generada es suficiente para la desactivación de las bacterias.
- Irradiar el agua que contiene H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> electrogenerado y bacterias, acoplado una lámpara de UV-vis a la etapa de desinfección, con el fin de mejorar la efectividad de la desinfección.

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

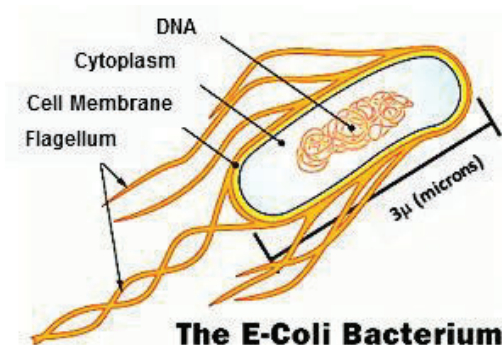
#### 2.1 MICROBIOLOGÍA EN EL AGUA DE CONSUMO

El agua de consumo humano puede contener diversos tipos de microorganismos como son bacterias, virus, protozoos y helmitos; una clasificación de estos se puede observar en el Anexo No 1. Sin embargo, la bacteria más representativa de aguas contaminadas con microorganismos, en particular con coliformes fecales, es la *Escherichia-Coli* (Ramirez *et al.*, 2005).

##### 2.1.1 ESCHERICHIA-COLI

La *Escherichia-Coli* (*Ecoli*) es una bacteria procariota sin núcleo definido, en la cual el material genético (ADN) se encuentra en el centro de la célula. Es del tipo Gram negativa, heterótrofa facultativa, es decir obtiene sus nutrientes y elementos estructurales como son las proteínas, lípidos, ácidos nucleicos y componentes enzimáticos de otros organismos (Murray *et al.*, 2015). Esta puede desarrollarse con presencia o no de oxígeno (Curtis *et al.*, 2008). Su estructura se muestra en la Figura 2.1.

**FIGURA 2.1: PARTES PRINCIPALES DE UNA BACTERIA *E. COLI***



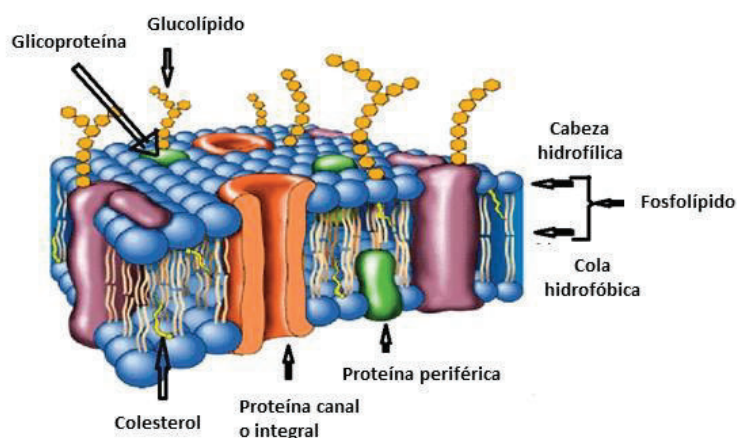
Fuente: Healthdefine. Science & Beauty. *E.coli: 7 tips so you'll never get sick*. 2016

Existen miles de macromoléculas diferentes que componen a la *Ecoli*, unas tienen funciones estructurales, otras regulan la función celular y otras regulan la información genética. Algunas de las macromoléculas estructurales actúan recíprocamente con el agua formando la membrana celular (Madigan *et al.*, 2003).

La *Ecoli* puede transformar átomos, moléculas e iones de carbón, nitrógeno, fosforo, calcio, potasio y otras, del medio y utilizarlas para sus procesos de: crecimiento, reproducción y reservas de energía como son las moléculas de adenosin trifosfato (ATP). La dirección del movimiento de estas obedece a mensajes que llegan a través de distintos sensores que posee y que tienen la capacidad para detectar alimentos y sustancias nocivas (Curtis *et al.*, 2008).

Madigan *et al.* (2003), en su libro afirma que la membrana de las bacterias posee una bicapa líquida compuesta por una parte hidrofílica compuesta principalmente por glicerol e hidrofóbica compuestas por ácidos grasos. En general la estructura de la membrana es estabilizada por puentes de hidrógeno y las interacciones iónicas de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  con grupos polares de carga negativa presentes en los fosfolípidos.

## FIGURA 2.2: MEMBRANA CELULAR COMPUESTA POR FOSFOLÍPIDOS, ENZIMAS Y OTROS



Fuente: Mariana. Introducción a la Biología. *Membrana celular: Estructura* [Blog]. 2016

El transporte de elementos a través de la membrana celular está regida por varios mecanismos muy complejos. Como referencia se tiene, el transporte debido a la diferencia de concentración de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{K}^+$  por la acción de proteínas que forman canales iónicos entre el medio externo y el interior de la membrana, y por la acción de proteínas transportadoras que regulan el paso de solutos como la glucosa, el agua,  $\text{O}_2$  y otras moléculas no polares (Curtis *et al.*, 2008).

Ante ataques a la membrana celular o partes internas de la bacteria, la *E. coli* tiende a formar nuevos enlaces, estos son generalmente covalentes quedando iguales o diferentes a los destruidos, dependiendo de los átomos que se encuentren disponibles en los alrededores. El proceso lo realiza muy rápidamente con el fin de evitar daños mayores. (Curtis *et al.*, 2008).

## **2.2 ESTRATEGIAS DE DETERMINACIÓN Y CUANTIFICACIÓN MICROBIOLÓGICA**

### **2.2.1 DETERMINACIÓN DE POBLACIÓN BACTERIANA POR TUBOS MÚLTIPLES O NÚMERO MÁS PROBABLE (NMP)**

El método del NMP estima la densidad de población cuando una evaluación cuantitativa (células individuales) no es posible realizar. Esta técnica se basa en la observación de la presencia (positivo) o la ausencia (negativo) de características como son la turbidez y la generación de gas que las bacterias pueden generar en réplicas de diluciones consecutivas. El estimado de densidad poblacional se obtiene de la ocurrencia o no de estas características las mismas que se contrastan con una tabla de equivalencia (Camacho y Gilles, 2009). El medio empleado para esta prueba es el verde brillante que contiene entre sus componentes lactosa. La *E. coli* fermenta la lactosa y genera gases que son atrapados en una campana de vidrio lo que sirve de indicativo de su presencia (Leboffe y Pierce, 2012).

### 2.2.2 CUANTIFICACIÓN DE MICROORGANISMOS POR CONTEO

Para la cuantificación de microorganismos por conteo se puede realizar la siembra de las bacterias por vertido o extensión (Aquiahuatl *et al.*, 2004), (Santiago Dionisio, 2008). Esta técnica ocupa una dilución de bacterias que se los deposita uniformemente sobre toda la superficie de un recipiente que contiene agar. El propósito es observar el crecimiento de colonias individuales. La cuantificación de las bacterias se la realiza en unidades formadoras de colonias (Leboffe y Pierce, 2012).

### 2.3 NORMATIVA MICROBIOLOGÍA APLICABLE AL AGUA DE CONSUMO HUMANO

La OMS recomienda, analizar la presencia de *Ecoli* como indicador de contaminación de coliformes fecales en el agua de consumo humano, que es la forma de contaminación que más comúnmente se encuentra. Sin embargo, advierte que puede existir contaminación microbiológica dada por presencia de virus y protozoos. Las pruebas que recomienda la OMS para la detección de la *Ecoli* son dos, el método de filtración en membrana y la prueba del NMP que están descritos en la norma ISO 9308-1:2014 y 9308-2:1990. Los resultados a las dos pruebas deben ser nulos (OMS, 2006).

En el Ecuador la calidad del agua para consumo humano está descrita en la norma INEN 108:2011. Esta toma la segunda parte de la recomendación de la OMS en la que indica que el valor de la concentración de coliformes fecales mediante el uso de Tubos múltiples ( $\text{NMP}100^{-1} \text{ mL}^{-1}$ ), debe ser menor a 1,1. Esto significa que en el ensayo de NMP utilizando 5 tubos de  $20 \text{ cm}^3$  ó 10 tubos de  $10 \text{ cm}^3$  ninguno es positivo (INEN, 2011).

## 2.4 MÉTODOS DE DESINFECCIÓN DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO

La desinfección del agua es el último proceso, que se lleva a cabo en una planta de tratamiento para potabilizar el agua. Este tiene como objetivo, eliminar agentes patógenos que puedan causar enfermedades a los seres humanos. A continuación, se describen los tratamientos convencionales o comúnmente utilizados y los no convencionales que son relativamente nuevos.

### 2.4.1 CLORACIÓN

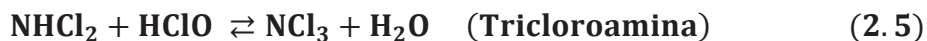
Es el método más empleado en desinfección de agua para consumo humano, por ser: económico, elimina una amplia gama de patógenos, y posee una acción residual que permite ampliar el proceso de desinfección durante el transporte (CONAGUA, 2007).

Los microorganismos son inactivados, por la destrucción de la pared celular (lisis) (Silva, 2013). En la bibliografía, se reporta que al aplicar cualquiera de las formas de cloro: cloro gas, hipoclorito de potasio o hipoclorito de sodio, este se hidroliza al entrar en contacto con el agua formando ácido hipocloroso, compuesto que causa el 99% de la desinfección mientras que el 1% restante lo realiza el hipoclorito (CONAGUA, 2007). Los parámetros que pueden afectar al proceso son: el tipo de microorganismo a eliminar, concentración del desinfectante, tiempo de contacto, temperatura, turbidez, compuestos nitrogenados, hierro, manganeso o sulfuro de hidrógeno y sobre todo el pH que debe estar entre 6 y 7 (Jaramillo Cazco, 2010), (Osorio *et al.*, 2010). El proceso sigue la siguiente reacción:





En el agua sin tratar, la presencia de materia orgánica e inorgánica como el hierro y manganeso modifica la cantidad de cloro necesario para la una correcta desinfección, por lo que es necesario incrementar su dosificación, sobre todo para tener disponible cloro residual (Osorio *et al.*, 2010). Los compuestos orgánicos a más de disminuir la eficiencia de la cloración, tiene un efecto contraproducente debido a la formación de cloraminas y sustancias organocloradas, a partir del amonio que puede estar en el agua como  $\text{NH}_3$  o  $\text{NH}_4^+$ :



Villanueva *et al.* (2001) en su estudio, recopilan información sobre varias afectaciones a la salud como los defectos de nacimiento en neonatos, problemas gastrointestinales y consecuencias mutagénicas por compuestos derivados de la cloración, sobre todo los trihalometanos que están formados por el cloroformo, bromodiclorometano, dibromoclorometano y bromoformo. Otros estudios, también reportan que los compuestos antes mencionados son cancerígenos (Ma *et al.*, 2011), (Castro de Esparza, 1992) y que a largo plazo podrían producir anemia y metahemoglobinemia que es una enfermedad referente a que, la hemoglobina puede transportar el oxígeno, pero es incapaz de liberarlo de manera efectiva a los tejidos corporales (Caíres Pereira Gusmão *et al.*, 2010).

Ma *et al.* (2011) reportan, que además de las desventajas del proceso de cloración como el sabor y olor, pueden existir microorganismos resistentes al tratamiento.

#### 2.4.2 OZONIZACIÓN

Uno de los compuestos más efectivos para la eliminación de patógenos es el ozono ( $\text{O}_3$ ) por su naturaleza reactiva.



Osorio *et al.* (2010) recomiendan, que por no ser espontánea su generación y recombinarse en oxígeno molecular, es necesario emplear métodos de generación *in situ* y de naturaleza: fotoquímica, radioquímica o la generación por descargas eléctricas de alto voltaje.

El agua que entra en contacto con el ozono, por lo general tiene la siguiente reacción:



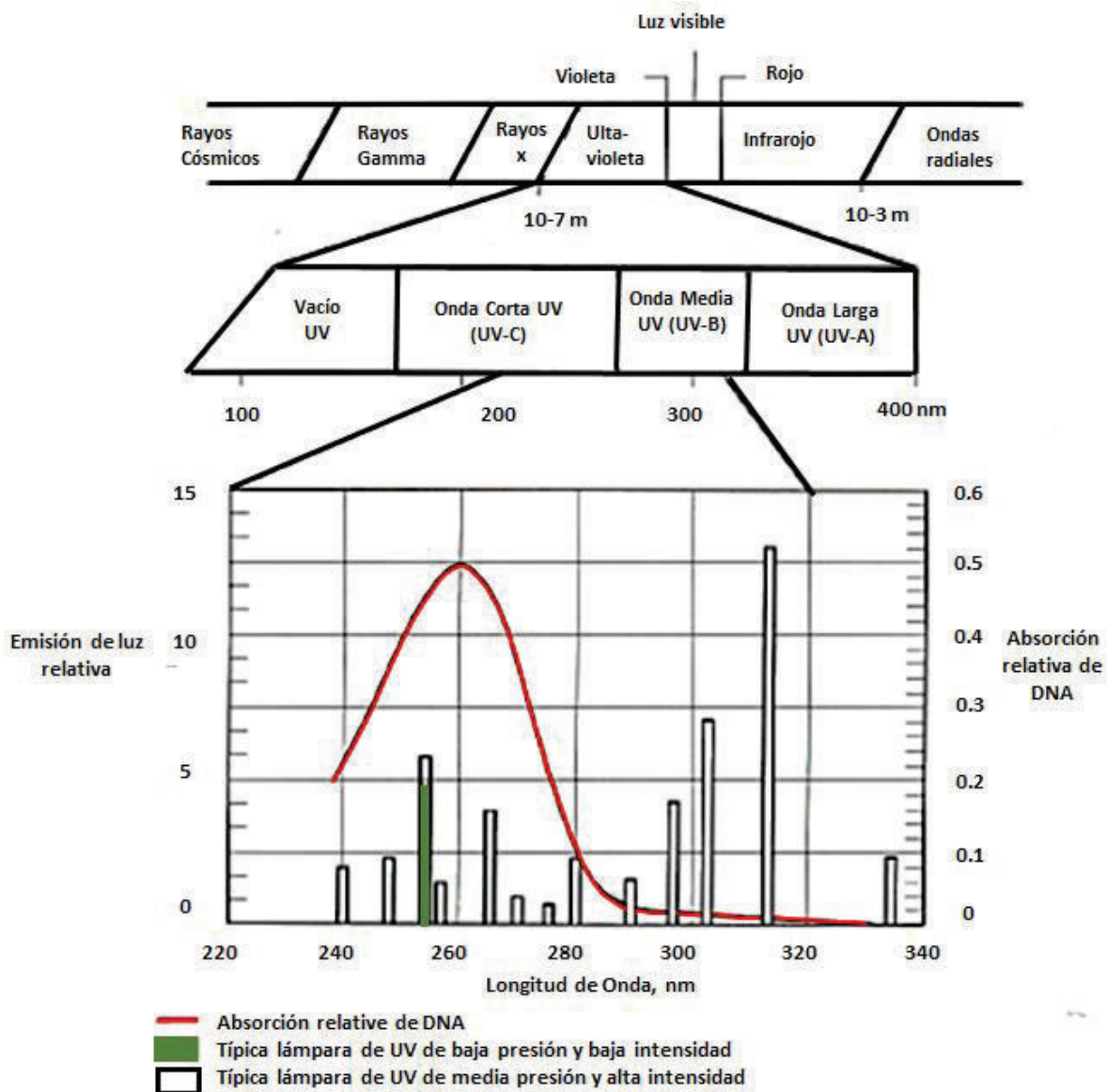
Los principales inconvenientes del empleo de  $\text{O}_3$  en la desinfección son: el consumo energético elevado, aproximadamente para la producción de  $0,5 \text{ g h}^{-1}$  la energía utilizada es de  $101 \text{ W-h g}^{-1}$  (Galvis *et al.*, 2005), debido a que requiere potenciales que van de 15 kV a 25 kV (Galvín, 1995), y la posible generación de sustancias indeseables como el bromato que es un producto de la oxidación fuerte del bromuro y pasa a través de hipobromito ( $\text{BrO}^-$ ) a bromato ( $\text{BrO}_3$ ), que es considerado altamente cancerígeno (López, 2016), (Marcó, 2016).

### 2.4.3 RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

Investigaciones realizadas por varios autores, reportan que la desinfección con radiación ultravioleta (UV) tiene buenos resultados, por la gama de bacterias, virus, algas, levaduras, esporas y quistes de protozoos que puede inactivar (Tarrán, 2002), (Baxter *et al.*, 2007), (Sommer *et al.*, 1998), (Osorio *et al.*, 2010). El detalle de los microorganismos, se los puede ver detalle en el Anexo No 2.

En la Figura 2.3, se muestra el espectro electromagnético. La radiación ultravioleta, está dividida en cuatro zonas, la que se emplea en desinfección es la UV de onda corta.

**FIGURA 2.3: ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y SU ABSORCIÓN POR LA BACTERIA *E. COLI***



Fuente: Hammeken Arana y Garc3a, 2005.

La longitud de onda óptima para la eliminación de patógenos se encuentra en 254 nm, correspondiente a la franja de UV-c que es muy cercana a la longitud de onda en la cual el ADN y ARN (ácidos nucleicos) tienen su mayor absorción 260 nm, originando reacciones fotoquímica que alteran estos compuestos moleculares esenciales (Hammeken y García, 2005), (Tarrán, 2002). Investigaciones muestran que la radiación absorbida, promueve la unión entre nucleótidos adyacentes creando moléculas dobles esto impide que se duplique su ADN y ARN, interrumpiendo así su reproducción (Wright y Cairns, 1990) .

Espinosa López y Llanes Mazón (2004) como resultado de sus investigaciones plantean que existen varios mecanismos de fotoreparación, los mismos que tienen como objetivo mantener la información genética en el ADN de las bacterias intacta, ya que esta se relaciona con la replicación. Entre los mecanismos propuestos por los investigadores se tiene: a) la reparación directa, en la que se revierte la lesión eliminando la zona afectada, b) la reparación por escisión que cambia los genes afectados por otros resistentes a la luz, y c) la reparación inducida, que aparece si se tiene un daño masivo en el ADN, aquí la bacteria impide la replicación del ADN dando tiempo a que se repare y evitando de esta forma la mutación que sería fatal para esta. Con todos estos mecanismos es posible lograr la reparación total de los daños causados por la radiación UV. Entonces, es prioritario suministrar la dosis adecuada en un intervalo de tiempo apropiado de forma que los daños causados a los microorganismos sean significativos. Como una medida complementaria, Wright y Cairns (1990) recomiendan evitar la luz solar en el agua desinfectada, puesto que la radiación solar ayuda a la fotoreparación.

Tarrán (2002) reporta, que para disminuir el número de bacterias a  $10^{-5}$  (fracción que sobrevive) la dosis es de  $35 \text{ mW s cm}^{-2}$  y para un valor menor a  $8 \text{ NMP } 100^{-1} \text{ mL}^{-1}$  es necesario una dosis de  $1039.2 \text{ mW s cm}^{-2}$  (Vermeulen *et al.*, 2008). Si se necesitase eliminar microorganismos como los coliformes fecales empleando únicamente luz ultravioleta, la dosificación recomendada varía entre  $6\ 000$  y  $10\ 000 \mu\text{W s cm}^{-2}$  (Acosta Castellanos *et al.*, 2015).

En algunos países la dosificación de radiación UV se encuentra normada: en Estados Unidos se recomienda una dosis de  $40 \text{ mW s cm}^{-2}$ , mientras que en Noruega, Austria y Francia la dosis es de 16, 30 y  $25 \text{ mW s cm}^{-2}$  respectivamente (Suárez y Jácome, 2009).

Para el cálculo de la dosis de radiación se valora la población de microorganismos mediante la Ley de Chick-Watson, (Arana y García, 2005), (Osorio *et al.*, 2010). El valor de la intensidad, se relaciona con la potencia de la lámpara que depende de la disponibilidad de esta en el mercado.

$$D_{UV} = I * t \quad (2.10)$$

Donde,  $D_{UV}$  es la dosis de radiación ultravioleta en  $\text{mW s cm}^{-2}$  o  $\mu\text{W s cm}^{-2}$ ,  $I$  es la intensidad, que es la potencia de la lámpara sobre el área en  $\text{mW cm}^{-2}$  o  $\mu\text{W cm}^{-2}$  y  $t$  se refiere al tiempo de exposición en s.

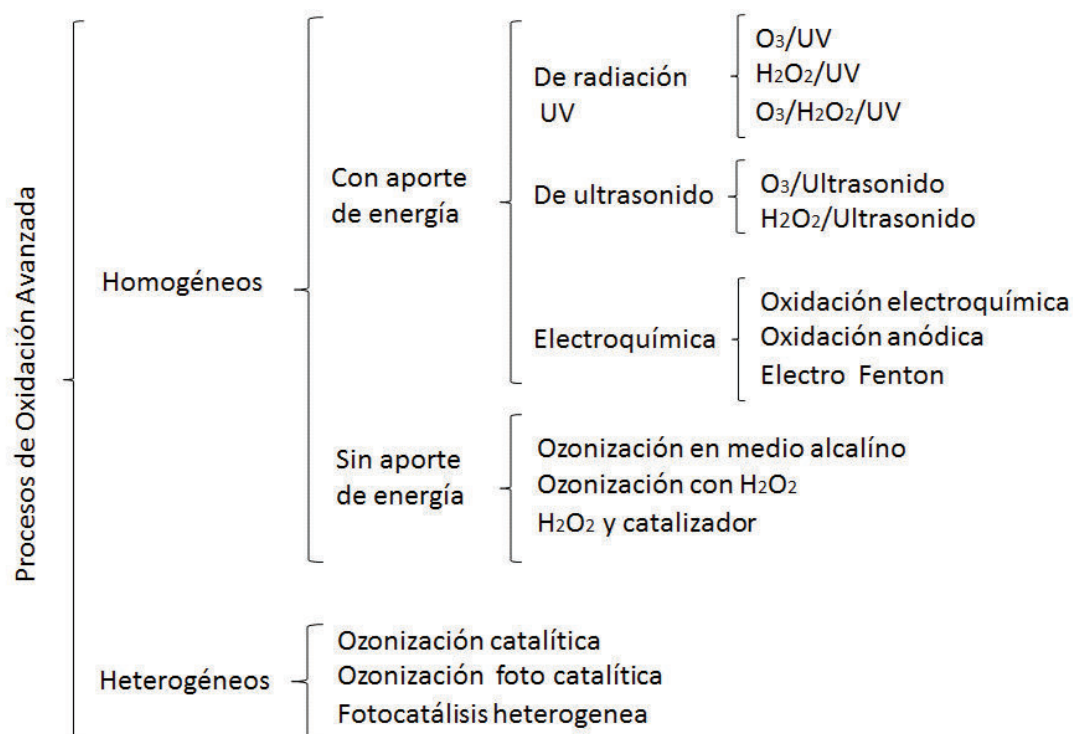
#### 2.4.4 PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POAs)

Los POAs para la desinfección de agua de consumo humano, tienen como objetivo la generación de radicales hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ), los mismos que reaccionarán con compuestos orgánicos e inorgánicos y serán modificados de acuerdo a los intereses que se tenga (García Calvo y Letón, 2012), (Maldonado *et al.*, 2008). Existen procesos sin y con aporte de energía externa, pero todos se orientan a la generación de los radicales  $\cdot\text{OH}$ , entre ellos tenemos: procesos de degradación fotoquímica, fotocatalisis, y procesos de oxidación química (Osorio *et al.*, 2010). A pesar que, en algunos de estos casos se podría generar indirectamente por el proceso electroquímico, compuestos oxidantes como persulfato, percarbonato, entre otros. (Polcaro *et al.*, 2007).

En la Figura 2.4, se resume la clasificación hecha por Osorio *et al.* (2010) para los procesos de oxidación avanzada: homogéneos en donde los reactantes se encuentran

en medio acuoso y heterogéneos en donde se emplea un catalizador sólido (García Herrera, 2014); con y sin aporte de energía.

**FIGURA 2.4: CLASIFICACIÓN DE LOS POAs**



ELABORADO POR: Wilber Guamán en base a Osorio *et al.*, 2012, pp 47, 48

De los procesos de oxidación avanzada, el que se va a emplear en el presente estudio es la combinación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con radiación ultravioleta, es decir un proceso homogéneo con aporte de energía. Osorio *et al.* (2010) afirman, que en un sistema con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV es posible mineralizar completamente cualquier compuesto orgánico hasta llegar a tener como productos finales CO<sub>2</sub> y agua. Es decir, transforman completamente al contaminante en compuestos menos peligrosos (Domènech *et al.*, 2001), en contraposición con otros procesos como la cloración, que deja varios compuestos indeseables que ya fueron descritos.

## **2.5 ELECTROQUÍMICA**

La electroquímica es la rama de la química que estudia un amplio número de fenómenos, entre estos se encuentran el estudio de materiales para sensores, diseño de celdas de combustible, análisis de corrosión, procesos de electroerosión o electrodeposición, producción de cloro y aluminio, celdas microbianas entre otros que tienen que ver con la transformación de energía eléctrica en química y viceversa (Bard, Faulkner *et al.*, 1980), (Alzate Gaviria, 2008).

### **2.5.1 TIPOS DE ELECTRODOS**

#### **2.5.1.1 Electrodo de trabajo y contraelectrodo**

El electrodo de trabajo y el contraelectrodo, son sistemas físicos formados por uno o diferentes elementos químicos, de diversas formas geométricas y de varios tamaños (Damaskin y Petri, 1980). A estos electrodos sólidos, se los denomina de primera especie, mientras que a la solución iónica en la que se sumergen, y por la que circulará una corriente eléctrica, se la denomina de segunda especie (Damaskin y Petri, 1980).

Los electrodos de trabajo y contraelectrodo, pueden estar constituidos de diferentes materiales. Como ejemplo se tiene, los electrodos de platino, grafito, acero inoxidable u otros materiales con características estables, es decir, que no reaccionen químicamente con el medio circundante (Flores, 2013), (Peralta Reyes y Natividad Rangel, 2013).

#### **2.5.1.2 Electrodo de referencia**

El electrodo de referencia comúnmente empleado en trabajos de investigación es de plata / cloruro de plata (Ag/AgCl), mismo que permite medir la diferencia de potencial entre este y el electrodo de trabajo (Farrera Gamboa, 2013). El objetivo de utilizar un

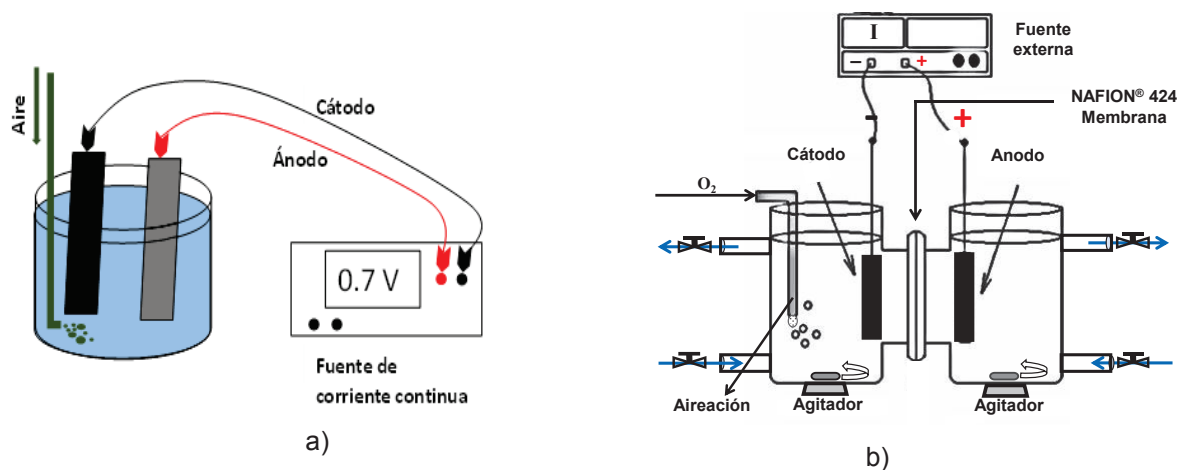
electrodo de referencia, es el minimizar la generación de potenciales indeseables que aparecen al tener una fase líquida en medio de los electrodos sólidos. Alrededor del electrodo sólido, se genera una capa iónica que incrementa el potencial medido (Cerón y Soto Bubert, 2004).

## 2.5.2 CELDAS ELECTROQUÍMICAS

En general, existen dos procesos que se dan electroquímicamente el proceso espontáneo, que se lleva a cabo en una celda galvánica y genera energía eléctrica a partir de reacciones químicas, y el proceso no espontáneo que necesita energía externa para producir reacciones químicas, y se lleva a cabo en una celda electrolítica (Chang, 2002).

En la celda simple, representada en la Figura 2.5 (a), los compuestos que se reducen en el cátodo, son oxidados al entrar en contacto con el ánodo. Con el fin de evitar esta oxidación anódica, se juntas dos celdas mediante una membrana como se representa en la Figura 2.5 (b), esto incrementa la eficiencia del proceso (Espinoza Montero *et al.*, 2013).

**FIGURA 2.5: CELDA ELECTROLÍTICA SIMPLE Y TIPO H**



Fuente: a) Wilber Guamán, b) Espinoza *et al.*, 2013



En este estudio, se emplearán celdas electrolíticas simples y de tipo H con tres electrodos y una fuente externa de energía eléctrica de baja potencia.

### 2.5.3 VOLTAMPEROMETRÍA

Existen varios tipos de voltamperometrías, como las: cíclicas, de barrido lineal, de onda cuadrada, escalonada entre otras, que se las realiza sobre una solución electrolítica. Cada una de estas, aplica un voltaje que varía con el tiempo en forma diferente (Digi-ly, 2012). La selección dependerá del fenómeno a estudiar. Las técnicas que se emplearán en este estudio son:

- Voltamperometría cíclica (VC), en esta se suministra un voltaje que va incrementándose uniformemente desde un mínimo hasta un máximo fijado por el usuario, para luego ir disminuyendo con la polaridad inversa de los electrodos. La corriente que circula por el sistema se va registrando. Esta técnica permite observar en donde se produce o producen oxidaciones y reducciones.
- Voltametría de barrido lineal (LSV), es una parte de la voltametría cíclica en la que se ha fijado un potencial inicial y final para una observación más detallada del fenómeno en estudio (Bard *et al.*, 1980).

A continuación, se presentan tres zonas que aparecen cuando se aplica una VC a una solución acuosa aireada. Estas reacciones, son características de la reducción del oxígeno que se encuentra disuelto en la solución. Los cambios de pendiente, indican que se está llevando a cabo un proceso de reducción diferente, mientras que la forma de la curva, dependerá de la solución con la que se esté trabajando (Espinoza Montero *et al.*, 2013).

Zona I, el oxígeno se reduce obteniéndose peróxido de hidrógeno.



Zona II, el oxígeno se combina con el hidrógeno y se obtiene agua.

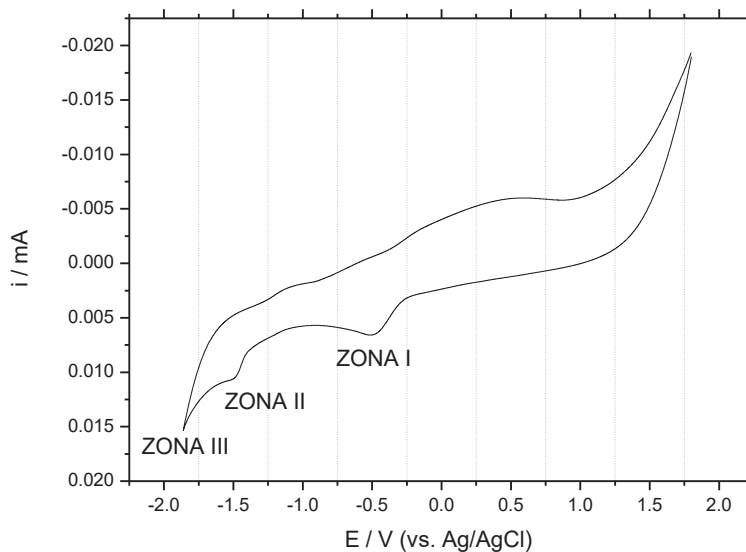


Zona III, el agua se descompone en hidrógeno y oxígeno gaseoso.



En el presente proyecto se trabaja en la Zona I, en donde se lleva a cabo la reducción del oxígeno a peróxido de hidrógeno.

**FIGURA 2.6: VOLTAMPEROMETRÍA CÍCLICA DE UNA SOLUCIÓN SATURADA CON AIRE**



ELABORADO POR: Wilber Guamán

Cada reacción tiene su propio potencial estándar<sup>1</sup>, esto quiere decir que cada reacción se dará a un potencial determinado.

Para encontrar el potencial total de la celda, teniendo como datos los valores de potenciales medidos con el electrodo de referencia, se empleará la siguiente relación matemática:

$$E_c = E_{red} - E_{ox} \quad (2.15)$$

Donde,  $E_c$  es la fuerza electromotriz (fem) o el potencial de la celda, entre los terminales externos de los electrodos medido en voltios,  $E_{red}$  es el potencial de reducción medido respecto al electrodo de referencia en voltios,  $E_{ox}$  es el potencial de oxidación en voltios (Farrera Gamboa, 2013).

#### **2.5.4 CINÉTICA DEL PROCESO EMPLEANDO ELECTRODO DE DISCO ROTATORIO**

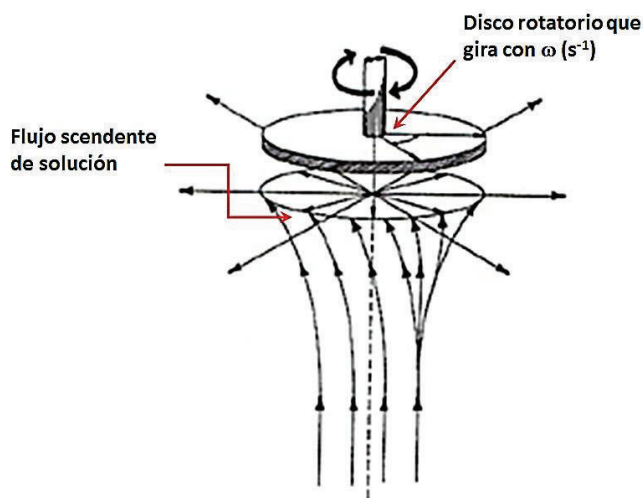
El procedimiento de voltametría de electrodo de disco rotatorio creado en 1962 por el Dr. Benjamin Levich, es el más utilizado hasta el presente para observar la cinética de las reacciones químicas (Rieger, 1987).

Este método, por su confiabilidad permite mantener constante el espesor de la capa de fluido en contacto y minimizar la interferencia de la doble capa en las mediciones (Town *et al.*, 1991).

---

<sup>1</sup> El potencial normal o estándar  $E^\circ$  se lo mide con respecto a un electrodo de hidrógeno (EEH) a condiciones estándar (1 atmósfera, 25°C y  $C_{iones} = 1$  M). Los valores son presentados con respecto a este electrodo, sin embargo son una buena guía para observar los cambios que sufrirán los compuestos sometidos a un mayor o menor potencial. El potencial de hidrógeno es tomado como referencia,  $E^\circ = 0$  (v). Los otros potenciales son medidos respecto al hidrógeno.

**FIGURA 2.7: ELECTRODO DE DISCO ROTATORIO**



Fuente: Dragasma, 2010

El electrodo de disco rotatorio, además de lo expuesto presenta ventajas adicionales como trabajar en un flujo laminar para un amplio rango de velocidades de rotación en discos pequeños (PINE, 2016). Las condiciones de transporte de materia, pueden ser modificadas variando la velocidad de rotación. Los procesos, se pueden analizar con la ecuación de Koutecky - Levich, que simplifica en gran manera los cálculos (Walsh, 1999), (Bard *et al.*, 1980). Esta se presenta a continuación:

$$\frac{1}{i_i} = \frac{1}{i_k} + \frac{1}{(0.62 n F A D^{3/2} \nu^{-1/6} C)} \omega^{-\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

Donde,  $i_i$  es la corriente que se genera al suministrar un voltaje variable con el potencióstato, medida con el amperímetro en amperios,  $i_k$  es la corriente de la componente cinética media en amperios,  $n$  es el número de electrones que se transmiten en el proceso de transferencia de masa,  $F$  es la constante de Faraday  $96485 \text{ C mol}^{-1}$ ,  $A$  es el área del electrodo de trabajo en  $\text{cm}^2$ ,  $D$  es el coeficiente de transferencia del oxígeno en  $\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ,  $\nu$  es la viscosidad cinemática dada en  $\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ,  $C$

es la concentración del oxígeno en la solución en  $\text{mg cm}^{-3}$ ,  $\omega$  es la frecuencia en  $\text{s}^{-1}$  (Bard *et al.*, 1980), (PINE, 2016).

Para el agua se tiene los siguientes valores:  $\nu$  aproximadamente  $0.01 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1000 rpm que es  $100 \text{ s}^{-1}$ ,  $\gamma$  es  $0.036 \text{ cm}$  y  $D$  aproximadamente  $10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  (Town *et al.*, 1991).

Con ayuda de la ecuación de Tafel que relaciona la parte cinética del proceso (Bard *et al.*, 1980) y conociendo las otras variables, se puede determinar la cantidad de electrones que intervienen en el proceso de reducción del oxígeno a peróxido de hidrógeno y los parámetros cinéticos  $j_0$  y  $\alpha$ .

$$\log j_k = \log j_0 - \frac{\alpha n F}{(2.3 R T)} \eta \quad (2.17)$$

$$\eta = E^* - E_0 \quad (2.18)$$

Donde,  $j_k$  es la densidad de corriente cinemática en  $\text{A cm}^{-2}$ ,  $j_0$  es la densidad de corriente en  $\text{A cm}^{-2}$ ,  $\alpha$  es el coeficiente de transferencia,  $n$  es el número de electrones transferidos en el proceso cinemático,  $\eta$  es el valor de sobrepotencial en voltios,  $R$  es la constante de los gases  $8.3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$ ,  $T$  es la temperatura en  $^\circ\text{K}$ ,  $E^*$  potencial medido entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia en voltios.

### 2.5.5 ELECTROGENERACIÓN DE $\text{H}_2\text{O}_2$

La generación electroquímica de  $\text{H}_2\text{O}_2$  *in situ*, presenta ventajas como la seguridad ante una fuga eventual o reacciones de corrosión en el sistema, se llevan a cabo a presión atmosférica, costos de infraestructura bajos y flexibilidad de operación comparada con la generación tradicional que emplea la reducción electrolítica de:  $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ,  $\text{KHSO}_4$  y  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  o por la autoxidación de compuestos orgánicos

alquilhidroantraquinonas y isopropílico (Qiang *et al.*, 2002). Además, por ser un oxidante sumamente fuerte<sup>2</sup>. No menos importante son los riesgos que conlleva el transporte, la manipulación y almacenaje desde el lugar de producción hasta el sitio de aplicación (Panizza y Cerisola, 2008).

La generación de peróxido de hidrógeno, se obtiene al aplicar un potencial de reducción  $E^\circ$  igual a 0.68 V a condiciones estándar (Chang, 2002) a una celda electrolítica. Entonces se produce la electrolisis, fenómeno que suministra electrones al electrodo de trabajo, los mismos que pasan a reducir el oxígeno disuelto en el agua, generando de esta manera peróxido de hidrógeno (Espinoza Montero *et al.*, 2013).

Información complementaria de la producción experimental de  $H_2O_2$ , se exhibe en el Anexo No 4. En este, se resume la generación empleando diferentes electrodos (formas, disposición y materiales). También se indica, el empleo de oxígeno o aire para la saturación del medio, pues de esto dependerá la eficiencia del proceso.

### 2.5.6. EFICIENCIA DE LA GENERACIÓN

Panizza y Cerisola (2008) en sus estudios calculan la eficiencia de la corriente en la producción del  $H_2O_2$ , mediante la siguiente relación matemática:

$$C. E. = \frac{nFC_{H_2O_2}V}{\int_0^t Idt} * 100 \quad (2.19)$$

Donde,  $n$  es el número de electrones transferidos de la relación estequiometría,  $F$  es la constante de Faraday  $96485 \text{ C mol}^{-1}$ ,  $C_{H_2O_2}$  es la concentración molar del peróxido de hidrógeno,  $V$  es el volumen de la solución en el cátodo.

---

<sup>2</sup> Entre los valores más elevados de potencial de reducción, se encuentra el del  $H_2O_2$  que va desde,  $E^\circ$  igual a 1.763 V a pH 0 hasta  $E^\circ$  igual a 0.878 V a pH 14. A manera de comparación, se muestran los potenciales de reducción del Flúor  $E_{F_2/F^-}$  2.87V, del Ozono  $E_{O_3/O_2}$  igual a 2.07 V y del Cobalto  $E_{Co^{3+}/Co^{2+}}$  igual a 2.07 V, el siguiente es el peróxido de hidrógeno (Chang, 2002).

### 2.5.7 POTENCIA ELÉCTRICA

Para el cálculo de la potencia necesaria para la generación del peróxido de hidrógeno, se emplea la siguiente relación:

$$P = V * i \quad (2.20)$$

Donde, P es la potencia eléctrica en Watt, V es el voltaje aplicado en voltios e “i” es la corriente que circula por el sistema en Amperios (Robredo, 2001).

## 2.6 DESINFECCIÓN ELECTROQUÍMICA

La desinfección con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, es un tratamiento altamente eficiente. En forma de vapor, a una concentración del 35% es utilizado para la desinfección de equipo médico (Linley *et al.*, 2012). A concentraciones del 3% desinfecta alimentos (Ramón Avalos *et al.*, 2016) . Posee un amplio espectro de eliminación de patógenos como son las esporas, virus y bacterias (Labas *et al.*, 2008). Es amigable con el ambiente, pues su descomposición genera agua y oxígeno (Peralta Reyes y Natividad Rangel, 2013). Conserva su reactividad en un rango amplio de pH, que va de 0 a 11 (Panizza y Cerisola, 2008).

Es poca la literatura en la que se indica como exactamente se produce la inactivación de las células en presencia del peróxido de hidrógeno. Se cree que el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, oxida las biomoléculas como son los lípidos (fosfolípidos) y proteínas de la pared celular causando daños en esta (Linley *et al.*, 2012). También se cree que modifica las enzimas, que se encargan de controlar el transporte de elementos entre el medio externo e interno de la célula (Labas *et al.*, 2008).

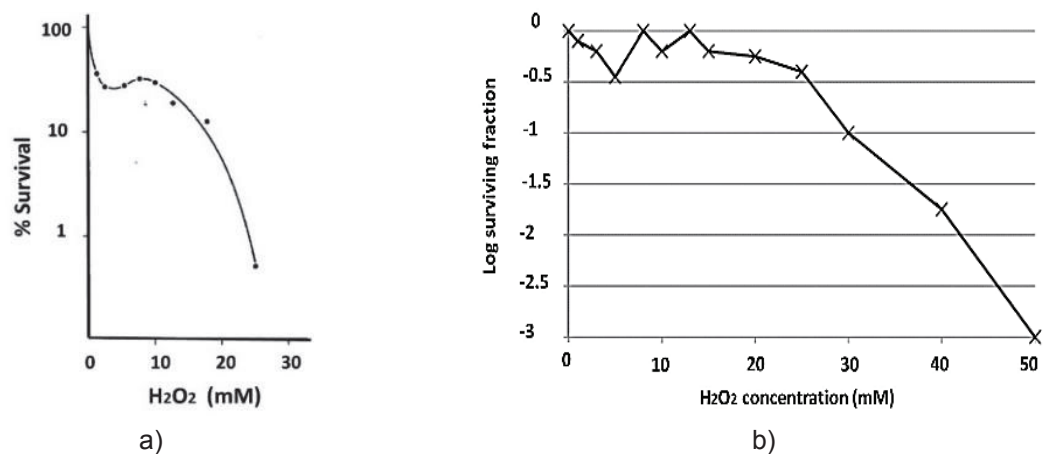
Investigaciones realizadas con *Ecoli*, proponen dos caminos de inhibición bacteriana debido al ataque con radicales  $\cdot\text{OH}$ :

- La primera, se da cuando el  $\text{H}_2\text{O}_2$  ingresa al interior de la bacteria y por efecto del  $\text{Fe}^{2+}$ , propio del ADN se generan radicales  $\cdot\text{OH}$ , los mismos que atacan las cadenas nitrogenadas de este, rompiéndolo o causando daños importantes que evitan su replicación (Imlay y Linn, 1986).
- La segunda forma de ataque, se da al exterior de la bacteria, los radicales  $\cdot\text{OH}$  generados por algún tipo de POAs, como la radiación UV en conjunto con el  $\text{H}_2\text{O}_2$ , atacan los lípidos, proteínas y enzimas afectando gravemente la membrana celular. Una de las consecuencias de la peroxidación, que es la oxidación de los lípidos, es el aumento de rigidez de la membrana, que finalmente lleva a una pérdida de su permeabilidad (Labas *et al.*, 2008). También es importante, el ataque que sufre el flujo de calcio citosólico ( $\text{Ca}^{+2}$ ), puesto que es el mensajero interno de la bacteria (Cantoni *et al.*, 1988).

En la Figura 2.8, se muestran dos curvas de sobrevivencia para la *Escherichia coli* al ser expuesta a diferentes concentraciones de  $\text{H}_2\text{O}_2$  por 15 minutos. Como se puede observar, al utilizar 2.5 mM de peróxido de hidrógeno, se logra una disminución en la cantidad de bacterias. Esta baja concentración, permite el ataque al ADN con el mecanismo indicado anteriormente. Para concentraciones superiores a 15 mM, los daños ocurren en la membrana celular (Linley *et al.*, 2012).

Otras investigaciones reportan, que a concentraciones mayores a 100 ppm y 150 minutos de aplicación, se logra la desactivación (un daño importante que no permite la recuperación de la bacteria) de la *Ecoli* en un 99.99% (Labas *et al.*, 2008).



**FIGURA 2.8: CURVAS DE SOBREVIVENCIA DE LA BACTERIA *E. COLI***

Fuente: a) Cantoni *et al.*, 1988 , b) Linley *et al.*, 2012

Existe un número considerable de estudios, sobre la eliminación de patógenos en agua empleando métodos electroquímicos. Los trabajos generalmente se enfocan a la eliminación de patógenos suministrando una corriente eléctrica alta de 1 amperio a 3 amperios. En el Anexo No 5, se presenta los resultados obtenidos por autores con diferentes electrodos. Adicionalmente, en la Tabla 2.1 se muestra los resultados de la aplicación de POAs. Se puede observar, la no existencia de datos para los tratamientos de *E. coli* y coliformes fecales con el uso de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

**TABLA 2.1: POAs UTILIZADOS EN LA ELIMINACIÓN DE PATÓGENOS**

Tratamiento de desinfección	<i>E. fecalis</i>		<i>E. coli</i>		<i>S. enteritidis</i>		Colifago MS2	
	Dosis	Reducc. (log)	Dosis	Reducc. (log)	Dosis	Reducc. (log)	Dosis	Reducc. (log)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	150	0.11	nd	nd	nd	nd	150	0.06
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /UV (mg L <sup>-1</sup> ) (mWs cm <sup>-2</sup> )	150/10	1.18	nd	nd	nd	Nd	150/38	1.74
Hipoclorito de sodio (mg L <sup>-1</sup> )	12	2.69	18	0.28	18	0.44	18	1.03
UV (mWs cm <sup>-2</sup> )	10	1.20	14	1.44	10	2.61	38	1.40

nd: no determinado debido a que el proceso no produce apenas desinfección en las condiciones indicadas.

FUENTE: Osorio *et al.*, 2010

## CAPÍTULO 3

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

A continuación, la metodología que se siguió para la determinación de los parámetros cinéticos, generación de  $H_2O_2$  y pruebas microbiológicas.

Para la determinación de los parámetros cinéticos, se realizaron voltamperometrías cíclicas y de barrido lineal, en medios ácido, neutro y alcalino. Este proceso, permitió delimitar la zona de trabajo en cada medio. Con los rangos de voltaje encontrados, se realizaron nuevas voltamperometrías de barrido lineal, con un electrodo de disco rotatorio, y a diferentes velocidades de giro, obteniéndose los datos necesarios para verificar la factibilidad de la generación del  $H_2O_2$ . Los equipos utilizados fueron un potenciostato (CH Instruments de la serie 1200A) y un electrodo de disco rotatorio (Autolab-Metrohm).

Antes de empezar la producción de  $H_2O_2$ , se procedió a la selección del electrodo de trabajo y del contraelectrodo. Para esto, se realizaron pruebas de conductividad eléctrica y resistencia al desgaste.

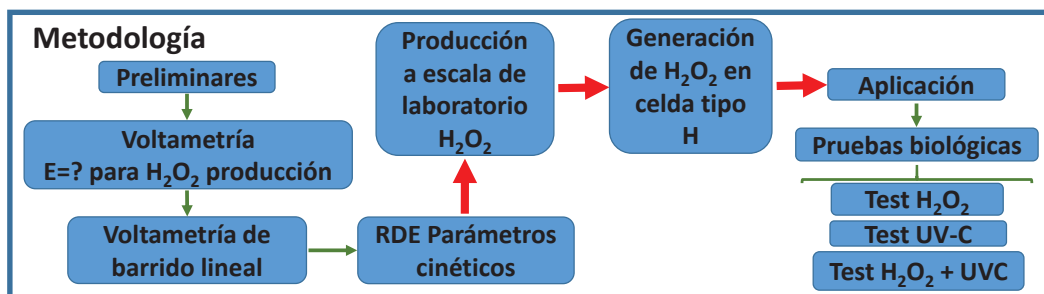
Con un intervalo de voltaje definido y los electrodos seleccionados, se realizó la producción de peróxido de hidrógeno a escala en una celda simple. Los equipos utilizados fueron, una fuente de poder de corriente continua (BK Precision modelo 1740B) y una bomba de aire (AC 1000 Resun) necesaria para saturar el medio.

Determinado el valor de voltaje de generación del  $H_2O_2$ , se escaló la producción a una celda de tipo H. Se ocupó la misma bomba de aireación y la misma fuente de poder.

La producción de peróxido de hidrógeno, generado en la celda simple y la celda tipo H, fue cuantificado mediante la titulación con permanganato de potasio.

Para verificar la eficacia del proceso, se generó  $H_2O_2$  en agua entubada, luego se la contaminó con *Ecoli* y se comprobó la eliminación de esta. Una segunda prueba, consistió en contaminar con bacterias el agua entubada (sin colocar  $H_2O_2$ ) e irradiarla con luz ultravioleta de onda corta. Finalmente, una tercera prueba combinando los dos procesos anteriores fue realizada. Entre los equipos que se utilizaron se encuentran una cabina de bioseguridad Clase II (Labconco Parts & Services), una incubadora (Precision, GCA Corporation, Modelo 611) y una lámpara de luz UV-c (Ultravioleta S.A.).

**FIGURA 3.1: ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA A SEGUIR EN EL PROYECTO**



ELABORADO POR: Wilber Guamán

### 3.2 ANÁLISIS ANALÍTICO

Para el desarrollo del proyecto, fueron utilizados los siguientes elementos y compuestos:

- Nitrógeno (de alta pureza 99.999%, AGA), para desplazar el oxígeno del medio acuoso y realizar una voltamperometría cíclica comparativa.

- Disoluciones de, ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ , con una pureza de 65.30%, densidad relativa  $\delta_r = 1.395$ , reactivo Mallinckrodt), sulfato de potasio ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ , con una pureza del 99%, reactivo BDH Chemicals Ltd.) y solución de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ , 2 N, reactivo Fisher Scientific) con bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ , con una pureza del 99%, reactivo H.V.O.). Fueron utilizados para preparar los medios, ácido, neutro y alcalino, en los que se generó  $\text{H}_2\text{O}_2$ .
- Permanganato de potasio ( $\text{KMnO}_4$ , reactivo Sigma Chemical Company), peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$  al 30%, densidad relativa  $\delta_r = 1.10$ , reactivo Fisher Scientific) y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , con una pureza entre 95 y 97%, reactivo Merck) se utilizaron para elaborar una curva de concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  vs.  $\text{KMnO}_4$ , necesaria para la cuantificación del peróxido electrogenerado.
- La membrana, fue fabricada con *agarosa* de uso común A9539-500G (reactivo Sigma), y como solución iónica se empleó cloruro de potasio ( $\text{KCl}$ , con una pureza del 99.5%, reactivo Merck).
- En la realización de las pruebas microbiológicas se ocupó la cepa de *E. coli* ATCC8739 (Kwikstik Microbiologics), agar MacConkey, nutriente, caldo de bilis verde brillante 274000 al 2% (material microbiológico Becton, Dickinson and Company) y Peptona tamponada (según ISO 6579, material microbiológico Merck KGaA).

Adicionalmente, se utilizaron reactivos 21055-69 (reactivo Hach PermaChem), para comprobar que el agua a utilizar se encuentre libre de cloro.

### **3.3 PROCEDIMIENTOS**

Todas las pruebas de electrogeneración de  $H_2O_2$ , se realizaron en las siguientes condiciones ambientales: temperatura entre 16 y 20 °C, humedad relativa entre 48% y 60%, presión atmosférica entre 700 y 730 hPa.

#### **3.3.1 SELECCIÓN DE ELECTRODOS**

Para la selección del electrodo de trabajo, se midió la resistencia eléctrica. Una menor resistencia conlleva a utilizar una fuente de menor potencia. Como segundo criterio, se tiene la resistencia al desgaste, puesto que se deberá realizar la limpieza del electrodo. Para esto, se lijó la superficie con una lija No 240. Otros criterios de importancia para la selección fueron, la estabilidad del material para no interactuar con la solución en la que estará sumergido, su precio y la disponibilidad en el mercado para una fácil reposición. Los materiales que se probaron fueron, una barra cilíndrica de carbón usada como núcleo de batería y una barra rectangular de grafito empleada en procesos de electroerosión.

El contraelectrodo, fue seleccionado entre una placa de acero inoxidable de uso común (AISI300) y un alambre de acero aleado con Cr y Ni de uso odontológico (Morelli). El criterio de selección, fue que el material no reaccione con la solución y que posea una baja resistencia eléctrica.

Voltamperometrías cíclicas, fueron utilizadas como criterios de elección de los electrodos.

#### **3.3.2 VOLTAMPEROMETRÍA**

Para determinar los valores de potencial de reducción del oxígeno en diferentes medios, se emplearon voltamperometrías cíclicas realizadas con un Mini potenciostato

DY2100B. Para todos los casos, se empleó electrodo de grafito como electrodo de trabajo, placa de acero inoxidable (AISI 300) como contraelectrodo y como electrodo de referencia Ag/AgCl. Mediante pruebas preliminares, se estableció las condiciones de trabajo de acuerdo a la Tabla 3.1.

**TABLA 3.1: PARÁMETROS DE REFERENCIA PARA INICIAR LAS VOLTAMETRÍAS CÍCLICAS**

Parámetro	Medio			
	Ácido	Neutro	Alcalino	Agua entubada
Voltaje inicial (V)	0	0	0	0
Voltaje máximo (V)	1.5	1.5	1.4	1.8
Voltaje mínimo (V)	-0.6	-1.2	-1.8	-2.3
Polaridad inicial	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo
Velocidad de barrido (V/s)	0.1	0.1	0.1	0.1
Número de segmentos	3	3	3	3
Intervalo (V)	0.001	0.001	0.001	0.001
Tiempo de espera (s)	2	2	2	2
Sensibilidad (A/V)	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-04

ELABORADO POR: Wilber Guamán

Como medio ácido, se utilizó  $\text{HNO}_3$  0.2 M (Chang, 2002), en el medio neutro se empleó  $\text{K}_2\text{SO}_4$  0.05 M como electrolito y para el medio alcalino se preparó 2.10 g de bicarbonato de sodio y 227 mL al 0.1 M de hidróxido de sodio, aforados a 1000 mL (Awasthi *et al.*, 2013).

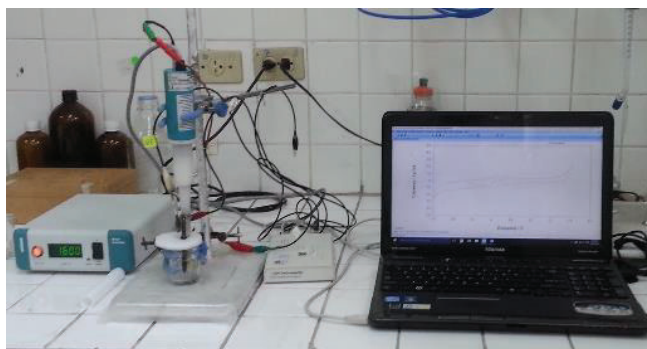
Para iniciar las pruebas, se realizaron voltametrías cíclicas con una solución de ácido nítrico saturado con nitrógeno y ácido nítrico burbujeado con aire para saturar de  $\text{O}_2$  el medio. En la solución saturada con nitrógeno, se esperó que no existan señales de la reducción de oxígeno, dado que el  $\text{N}_2$  desplaza al  $\text{O}_2$ . Además, estas señales sirvieron para escoger el valor de potencial de reducción de  $\text{O}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}_2$ , que es de interés en este trabajo de investigación.

### 3.3.3 CINÉTICA DEL PROCESO

#### 3.3.3.1 Generación de datos para la determinación de los parámetros cinéticos

Mediante voltametría lineal se estudió, la cinética de la reacción de reducción de  $O_2$  a  $H_2O_2$ , determinándose  $\alpha$ , y  $n$  mediante la ecuación de Koutecky-Levich y la ecuación de Tafel. El potenciostato CHI-1200A empleado fue acoplado a un rotor Metrohm Autolab (Fig. 3.2) con un electrodo de trabajo de disco rotario de carbón vítreo, una celda de tres electrodos de 300 mL y como contraelectrodo una barra de grafito. El electrodo de referencia usado fue de Ag/AgCl. La velocidad de barrido del potencial en el tiempo, que se programó en el equipo fue de  $15 \text{ mV s}^{-1}$ , las velocidades angulares fueron de 100, 400, 900, 1600 y 2500 rpm. Los medios ácido, neutro, alcalino y agua entubada utilizados para voltamperometría, fueron burbujeados con aire 30 min previo al experimento.

**FIGURA 3.2: DISCO ROTATORIO ACOPLADO A UN POTENCIOSTATO Y UN ORDENADOR**



ELABORADO POR: Wilber Guamán

En la Tabla 3.2, se muestra los rangos de voltajes para cada medio que fueron utilizados para voltamperometrías de barrido lineal. Los potenciales se encuentran en la zona I de reducción del oxígeno que genera  $H_2O_2$  (Ver Figura 2.6).

**TABLA 3.2: RANGO DE VOLTAJES DE TRABAJO PARA CADA MEDIO**

	Medio			
	Acido (HNO <sub>3</sub> 0.2M)	Neutro (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.1M)	Alcalino	Agua entubada
Rango de voltaje (mV)	0 a -0.4	0 a -0.6	0 a -0.4	0 a -0.6

ELABORADO POR: Wilber Guamán

### 3.3.3.2 Determinación de los parámetros cinéticos de la reacción de reducción de O<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Los valores de la corriente ( $i_i$ ) para cada voltaje ( $E^*$ ) generados a partir de las voltametrías de barrido lineal, correspondieron al denominador del término de la izquierda de la ecuación de Koutecky-Levich 2.16.

El siguiente paso, fue la generación de nuevas curvas con la inversa de la corriente en función de la inversa de la raíz cuadrada de cada velocidad de rotación (se deberá pasar de rpm a  $s^{-1}$ ). Según la ecuación de Koutecky-Levich (2.16) la pendiente de las nuevas curvas (linealizadas) corresponde al aporte de corriente, debido a la a la transferencia de masa para cada velocidad de barrido. Mientras, el valor de ordenada al origen (intersección) corresponde al aporte de la corriente cuando el proceso es controlado por la cinética de la reacción ( $i_k$ ). Estos valores de corriente, fueron divididos para el área del electrodo de trabajo para convertirlos en densidad de corriente ( $j_k$ ).

La curva de Tafel (2.17 y 2.18), se construyó utilizando la densidad de corriente cinética en función del sobrepotencial ( $\eta$ ), determinado de acuerdo a la ecuación  $\eta = E - E^{\circ}_{O_2/H_2O_2}$ , donde está tabulado ( $E^{\circ}$  igual a 0.68 V). También se debe sumar el valor del electrodo de referencia, respecto al de hidrógeno tiene un valor de 0.205 V (Sawyer, Sobkowiak, y Roberts, 1995). A partir de la pendiente de estas nuevas curvas linealizadas, se determinó el valor del coeficiente de transferencia  $\alpha$ , que afecta a la



parte cinética del proceso, ya que indica la medida de la simetría de energía de barrera de la reacción. Del valor de la intersección con las ordenadas, se determina la cantidad a la que esta elevado la base 10 y se despeja de la Ecuación 2.17 el valor de  $j_0$ .

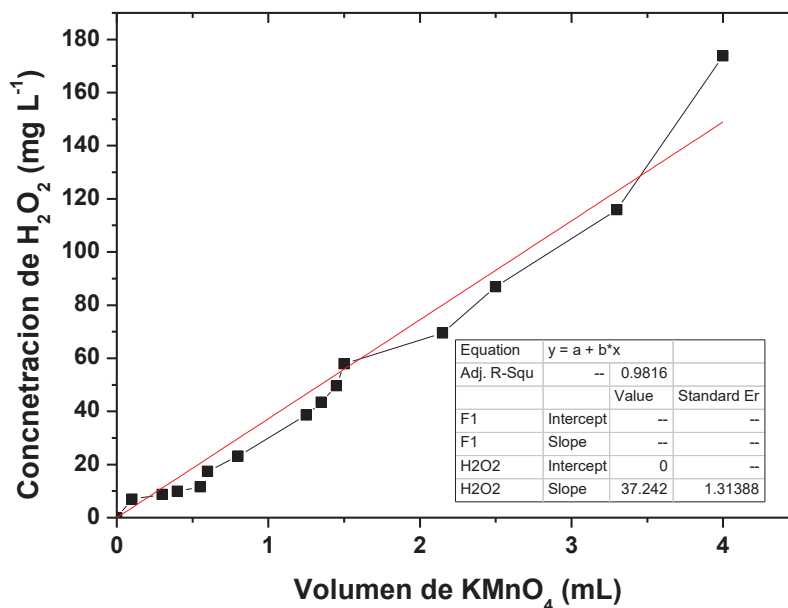
Los siguientes valores son utilizados para los cálculos:

Diámetro del electrodo igual a 0.003 m, Área del electrodo de trabajo calculada  $7.0686 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ,  $v$  es  $0.01011 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ,  $D$  es  $0.000024 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ,  $C$  es igual a  $3.125 \times 10^{-7} \text{ mol cm}^{-3}$  que equivalente a  $10 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $E_0$  es 0.68 V y  $E_{\text{Ag/Cl}/\text{H}_2}$  tiene un valor de 0.205 V.

### 3.3.4 PERMANGANOMETRÍA DE REFERENCIA

Para la cuantificación del peróxido de hidrógeno electrogenerado, se elaboró una curva que relaciona diferentes concentraciones de  $\text{H}_2\text{O}_2$  con el volumen consumido de  $\text{KMnO}_4$ .

**FIGURA 3.3: VOLUMEN DE  $\text{KMnO}_4$  vs. CONCENTRACIÓN DE  $\text{H}_2\text{O}_2$**



ELABORADO POR: Wilber Guamán

La relación matemática encontrada para la tendencia lineal fue:

$$[\text{H}_2\text{O}_2] = 37.243 * V_{\text{KMnO}_4} \quad (3.1)$$

Donde  $[\text{H}_2\text{O}_2]$ , es la concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en  $\text{mg L}^{-1}$ ,  $V_{\text{KMnO}_4}$  es el volumen de  $\text{KMnO}_4$  consumido en mL.

### 3.3.5 GENERACIÓN DE $\text{H}_2\text{O}_2$ EN CELDA TIPO BATCH

Para la realización de esta prueba, se empleó volúmenes de 500 mL de los siguientes medios: ácido nítrico 0.2 M, neutro sulfato de potasio 0.05 M, alcalino resultado de mezclar 2.10 g de bicarbonato de sodio y 227 ml 0.1 M de hidróxido de sodio, y agua no tratada (agua entubada). El electrodo de grafito comercial, se lo utilizó como electrodo de trabajo (cátodo), mientras que como contraelectrodo se empleó el alambre con aleación de Cr-Ni (ánodo). Se aireó a razón de  $25 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$  mediante una piedra porosa (diámetro de burbujas aproximadamente 1 mm). La separación entre electrodos fue de 10 mm.

**FIGURA 3.4: DISPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS PARA LA GENERACIÓN DE  $\text{H}_2\text{O}_2$  EN CELDA SIMPLE**



ELABORADO POR: Wilber Guamán

El área del electrodo de trabajo, que no entró en contacto con el medio fue cubierta con taípe, teniéndose así un área efectiva de 3996 mm<sup>2</sup>. El área del alambre de acero Cr-Ni fue de 11592.48 mm<sup>2</sup>. El tiempo total de generación fue de 300 minutos. El voltaje de la fuente externa, fue fijado de modo que el potencial entre el electrodo de referencia y el cátodo tomen los valores que se fijó en la voltametría cíclica (Zona I). Con estos valores se procedió a buscar el mejor valor de voltaje de generación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Los valores fueron corregidos cada 10 minutos, cambiando el potencial de la fuente. El H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> generado se cuantificó cada 30 minutos por medio de una titulación (Ecuación 3.1), para esto se tomó 2 mL de solución de trabajo y se la tituló con permanganato de potasio. Cuando fue necesario, se acidificó el medio tomándose 0.5 mL de ácido sulfúrico con una dilución de 1:5.

### 3.3.6 GENERACIÓN DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> EN CELDA TIPO H

La producción electroquímica, se realizó en una celda tipo H debido a que en la celda simple el peróxido formado en el cátodo fue descompuesto por oxidación en el ánodo, lo que redujo el rendimiento de generación.

En esta celda, se hizo indispensable el empleo de una membrana para separar las dos semiceldas, y que a su vez permitió el paso de los iones necesarios para que el circuito siga funcionando. Existen varios tipos de membranas que se han utilizado en otras investigaciones, como: el Nafion 424 (Espinoza Montero *et al.*, 2013), Nafion 324 y 112 (Peralta Reyes y Natividad Rangel, 2013) y otras de vidrio porosos. Sin embargo, en este proyecto se las construyó utilizando *agarosa*, que es una gelatina vegetal extraída de algas marinas (SIGMA, 1996). Los moldes fueron cajas de Petri de 90 mm de diámetro.

En el proceso de fabricación de la membrana, se probaron diferentes concentraciones con el objetivo de encontrar la mejor resistencia mecánica, manteniendo al mínimo el espesor. Las proporciones de *agarosa* probadas, fueron de 0.5, 1, 1.5 y 2.0 g en 50 mL de agua destilada (Figura 3.5a y b). Como resultado, se tuvo que la membrana preparada con 1.5 g de agar en 50 mL de agua es la que mejor resistió el acople de

las celdas. A concentraciones superiores a 1.5 g, se presentaron burbujas de aire en el interior de la membrana (Figura 3.5c).

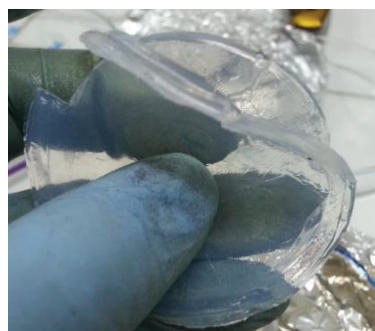
Otro parámetro, relacionado con la resistencia mecánica de la membrana fue el espesor. Los espesores que se probaron fueron de 2.0, 2.7, 3.0, 3.5 y 7.0 mm (Figura 3.5d), de estos se tuvo un buenos resultados a partir de los 3.0 mm.

Con el fin de lograr una buena circulación de iones a través de la membrana, se mezcló 0.75 g de agar con 25 ml de solución de cloruro de potasio en concentraciones de 0.1, 0.5 y 1 M. Los menores valores de resistencias eléctricas, se obtuvo con la concentración de 1 M y 0.5 M. Esta última, fue elegida por tener una concentración media y un valor de resistencia eléctrica igual a 879 K $\Omega$  (Figura 3.5e), que es aceptable comparado con los más de 2000 K $\Omega$  que se tuvo con una concentración de 0.1 M.

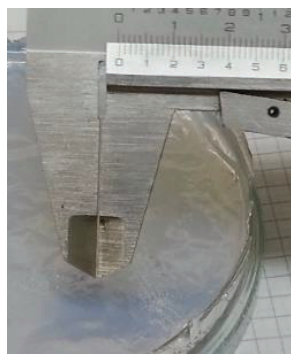
### FIGURA 3.5: CONSTRUCCIÓN DE MEMBRANA PERMEABLE PARA CELDA TIPO H



a)



b)



c)



d)

## CONTINUACION FIGURA 3.5



e)



f)

ELABORADO POR: Wilber Guamán

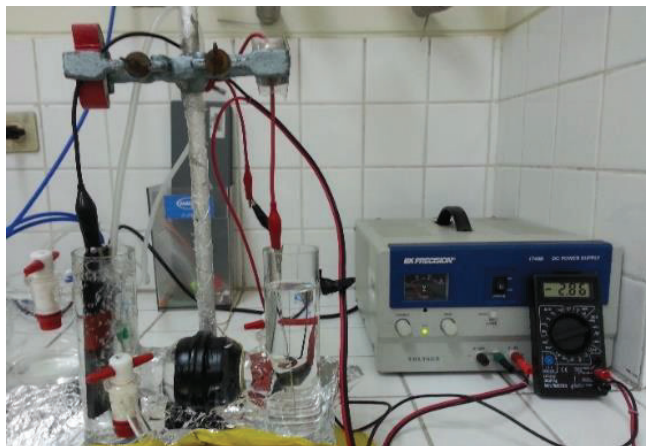
Los parámetros que se eligieron, para la construcción de las membranas fueron, 1.5 g de *agarosa* en 50 mL de solución electrolítica de KCl 0.5 M, espesor de 3 mm.

En la Figura 3.5f, se muestra la forma en que fue acoplada la membrana en medio de las dos semiceldas; cubierta con teflón y cinta adhesiva para evitar las fugas de los líquidos.

### 3.3.6.1 Procedimiento para la generación de $H_2O_2$ en la celda tipo H

Un volumen de 250 mL de agua no tratada fue colocado en cada semicelda. Los electrodos de trabajo (grafito comercial - cátodo) con un área de  $3996 \text{ mm}^2$  y contraelectrodo (lámina de acero inoxidable - ánodo) con un área de  $4125 \text{ mm}^2$  fueron situados en cada semicelda de forma que sus caras estén de frente, esto con el fin de generar la mayor cantidad de campo eléctrico uniforme. El electrodo de referencia fue ubicado cerca del de trabajo (Figura 3.6).

**FIGURA 3.6: EQUIPO UTILIZADO EN LA GENERACIÓN DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> EN CELDA TIPO H**



ELABORADO POR: Wilber Guamán

La forma de mantener el potencial estable, entre el electrodo de trabajo y el de referencia, así como la forma de cuantificación del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> electrogenerado fue similar a la empleada en la celda simple.

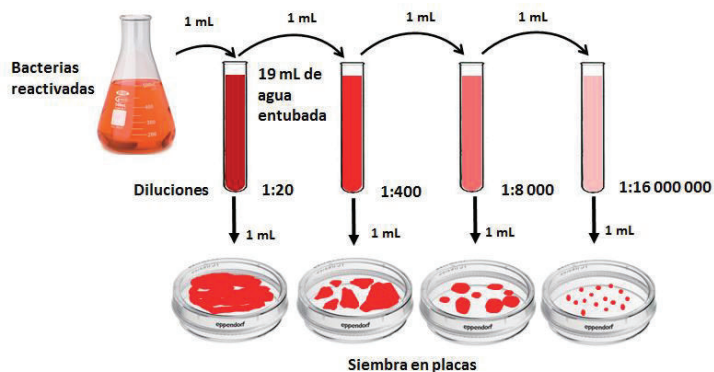
### **3.3.7 PRUEBAS BIOLÓGICAS**

Antes de realizar cualquier prueba biológica o de generación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, se verificó que el agua a ser utilizada se encuentre libre de cloro.

#### **3.3.7.1 Determinación del número inicial de bacterias**

El número de bacterias con el que se inicia las pruebas, fue determinado por dilución en serie de 1 a 20, siembra por vertido y conteo en placa de Petri con agar nutriente (Figura 3.7).

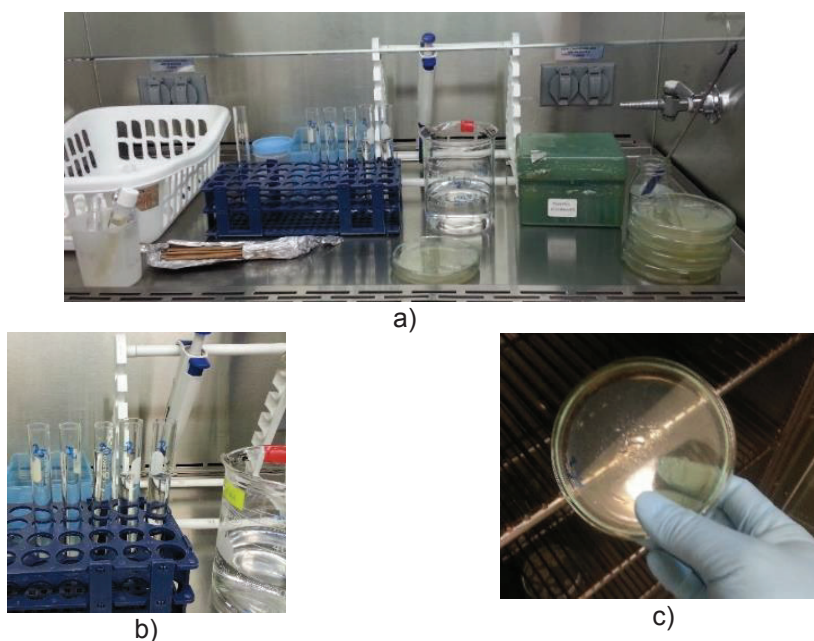
**FIGURA 3.7: DILUCIONES EN SERIE DE BACTERIAS**



ELABORADO POR: Wilber Guamán

En la Figura 3.8a, se muestra los instrumentos que se emplearon en el proceso de cuantificación del número inicial de bacterias. En la Figura 3.8b y c se observa, cuatro diluciones en serie de 1 mL en 19 mL y su posterior siembra. Las muestras fueron incubadas por 24 horas a 35 °C.

**FIGURA 3.8: PROCEDIMIENTO DE DILUCIÓN PARA DETERMINAR EL NÚMERO INICIAL DE BACTERIAS**



ELABORADO POR: Wilber Guamán



Para determinar el número de microorganismos, se tomó como válidas las cajas que contenían de 30 a 300 colonias (Aquiahuatl *et al.*, 2004). El conteo se lo realizó por sectores, con el criterio de tener un área densa, una media y otra con densidad baja. El cálculo del número de colonias, se lo encontró con la siguiente relación:

$$N_T = \left( \frac{N_D + N_M + N_B}{3} \right) * 65 \quad (3.2)$$

Donde,  $N_T$  es el N° total de colonias,  $N_D$  es el N° de colonias el área densa,  $N_M$  es el N° de colonias el área media,  $N_B$  es el N° de colonias el área baja (Santiago Dionisio, 2008).

Posteriormente, se calculó el número de unidades formadoras de colonia por mililitro con la siguiente relación:

$$N_{UFC} = \frac{N_T FD}{MS} \quad (3.3)$$

Donde,  $N_{UFC}$  es el N° de unidades formadoras de colonias dado en UFC mL<sup>-1</sup>,  $N_T$  es el N° total de colonias, FD es el factor de dilución y MS es el volumen de la muestra sembrada en mL (Santiago Dionisio, 2008).

Para la prueba que se realizó por duplicado, se determinó el promedio del  $N_{UFC}$ .

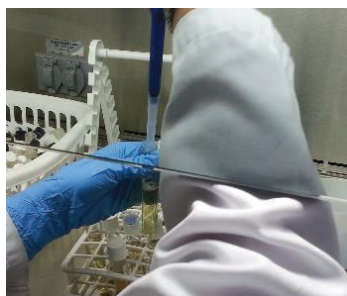
### 3.3.7.2 Prueba de sobrevivencia de bacterias en el agua no tratada

El agua no tratada, fue inoculada con bacterias para verificar la sobrevivencia de estas en dicho medio. De esta forma, se aseguró que el tratamiento es el que causó la desinfección. El método empleado para valorar esto es del número más probable, mismo que realiza una equivalencia entre los tubos positivos (fermentados) y el número de bacterias estimado, ver la tabla del Anexo No 3.

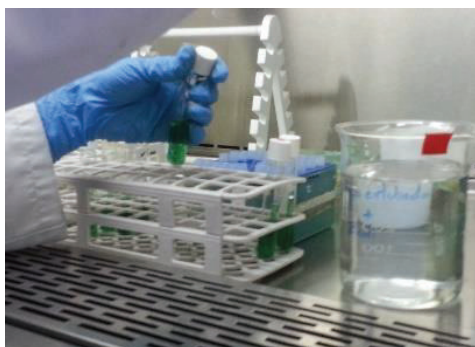


La Figura 3.9a, muestra la dilución de 2 mL de solución reactivada con bacterias en 500 mL de agua no tratada. Luego de cinco horas de permanecer en reposo, se tomó 1 mL del agua contaminada y se procedió al sembrado en tubos que contenían una solución con verde brillante, como lo muestra la Figura 3.9b. Pasadas 24 horas se observó el cambio de color, de verde hacia un amarillento turbio (Figura 3.9c). Estos tubos son los positivos, es decir, los que fermentaron.

### FIGURA 3.9: SOBREVIVENCIA DE BACTERIAS EN AGUA NO TRATADA



a)



b)



c)

ELABORADO POR: Wilber Guamán

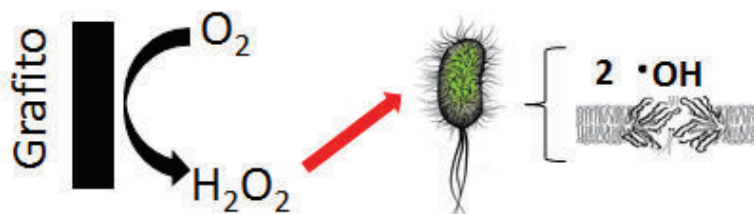
El resultado de las observaciones, tubos positivos y negativos se los llevó a una tabla (Ver Anexo No 3) que indica la probabilidad de tener una cierta población de bacterias y se basa en el principio de que una única célula viva puede desarrollarse y producir un cultivo que enturbiará la solución reactiva (Massol, 2002). Del juego de tubos sometidos a la prueba, se tuvo una combinación de NMP 55554 equivalente a 1 312 535 bacterias por mL. Es decir, las bacterias sobrevivieron en el agua no tratada.

### 3.3.7.3 Prueba de desinfección con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

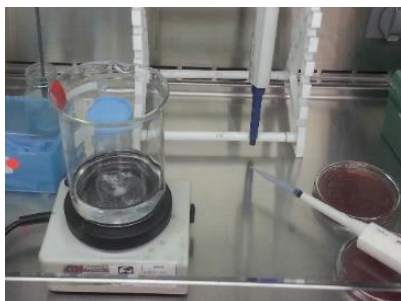
Esta prueba, se llevó a cabo con concentraciones superiores a las del peróxido de hidrógeno que fue generado electroquímicamente (41 mg L<sup>-1</sup>), de forma que se tenga una referencia de desinfección solo con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en agua no tratada.

En la Figura 3.10a, se muestra los instrumentos utilizados en la prueba de desinfección con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. El procedimiento, consistió en preparar diluciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en agua no tratada a las concentraciones de P<sub>1</sub> igual a 66 mg L<sup>-1</sup>, P<sub>2</sub> igual a 330 mg L<sup>-1</sup> y P<sub>3</sub> igual a 825 mg L<sup>-1</sup>, en un volumen de 200 mL (Figura 3.10b). En cada concentración, fue colocado 1 mL de solución de bacterias (N<sub>UFC</sub> igual a 8.96 x 10<sup>7</sup> UFC 100<sup>-1</sup> mL<sup>-1</sup>) y se agitó levemente por 10 minutos, tiempo en el que actuó el peróxido (Figura 3.10c). En cajas de Petri con agar Mc Conckey, fueron colocados 1 mL de cada disolución tratada (Figura 3.10d) y llevados a incubación a 35 °C por 24 horas.

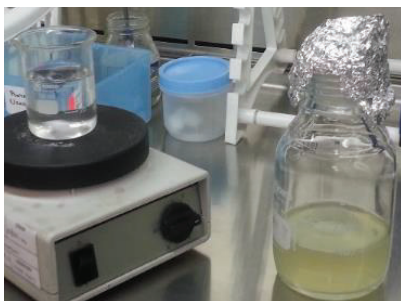
**FIGURA 3.10: PROCEDIMIENTO PARA LA PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**



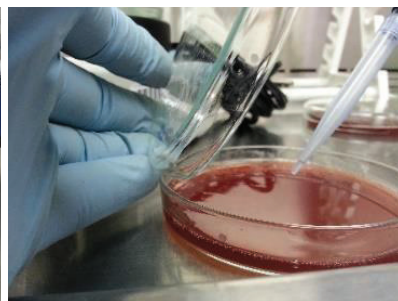
a)



b)



c)



d)

ELABORADO POR: Wilber Guamán

#### 3.3.7.4 Prueba de desinfección con radiación UV-c

Los tiempos para esta prueba, se ajustaron según el rango de datos encontrados en la revisión bibliográfica y a pruebas previas realizadas.

Para encontrar el tiempo necesario de inhibición de las bacterias, se determinó la intensidad de la radiación con los datos de la lámpara que tiene una potencia de 4 W y que fue aplicada sobre un caja de Petri de 45 mm de radio (área de 63.62 cm<sup>2</sup>). Entonces se tuvo una intensidad de 62.87 mW cm<sup>-2</sup>.

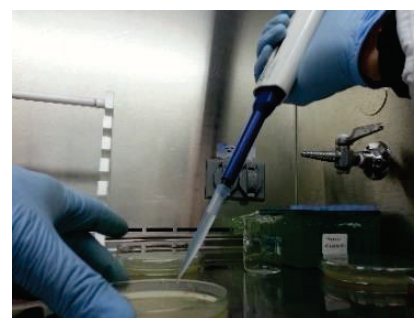
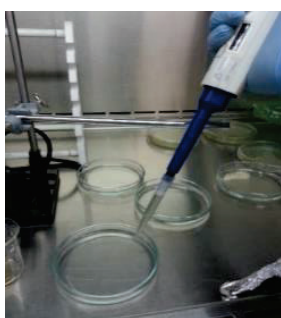
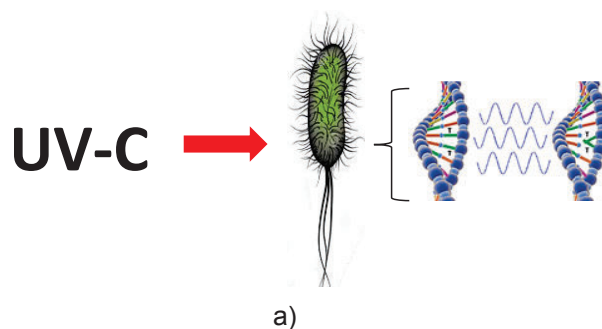
Con los valores de la bibliografía, sobre la dosis necesaria para inhibir a la *Ecoli* (10392 mW s cm<sup>-2</sup>) y la intensidad antes calculada, se determinó el tiempo de exposición (Ecuación 2.10) que resultó 162.29 s y que fue aproximado a 3 minutos.

En la Figura 3.11a, se presenta el esquema de la desinfección que se llevó a cabo con radiación UV-c. Para este proceso, se colocó 1 mL de bacterias reactivadas ( $N_{UFC}$  igual a  $8.96 \times 10^7$  UFC 100<sup>-1</sup> mL<sup>-1</sup>) en 20 mL de agua entubada (Figura 3.11b).

El agua contaminada con bacterias, fue irradiada por 2, 4 y 6 minutos con una intensidad de 62.87 mW cm<sup>-2</sup>. El extremo superior del recipiente que contenía agua con bacterias, se colocó a 3 mm de la lámpara para ser irradiado con luz UV-c. Las cajas, se mantuvieron con movimiento rotatorio manual de dos revoluciones por minuto (Figura 3.11c).

El siguiente paso, consistió en tomar 1 mL de cada muestra sometida a la radiación y verterla en cajas de Petri, procurando que el agar nutriente que contenían estas, sea cubierto en su totalidad de manera uniforme (Figura 3.11d). Por último, las cajas fueron llevadas a incubar a 35 °C por 24 horas.

### FIGURA 3.111: PROCEDIMIENTO PARA LA PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON RADIACIÓN UV-c



ELABORADO POR: Wilber Guamán

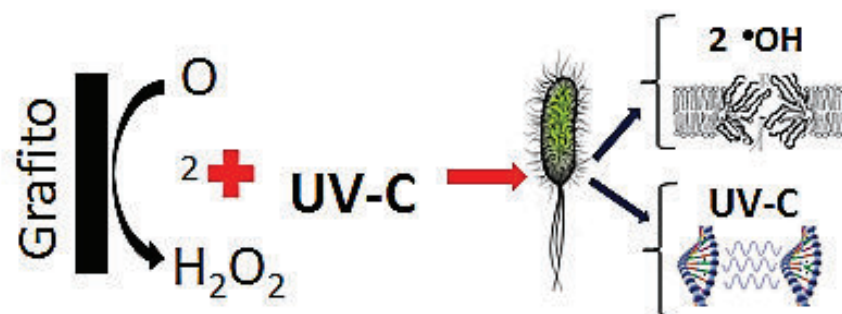
#### 3.3.7.5 Prueba de desinfección con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y radiación UV combinados

El objetivo de esta prueba, fue aplicar un proceso de desinfección combinado, de forma que la radiación ultravioleta además de provocar daños en la estructura del ADN de la bacteria, descomponga el peróxido de hidrógeno en radical  $\cdot\text{OH}$ , lo que causaría daños irreparables en la membrana celular.

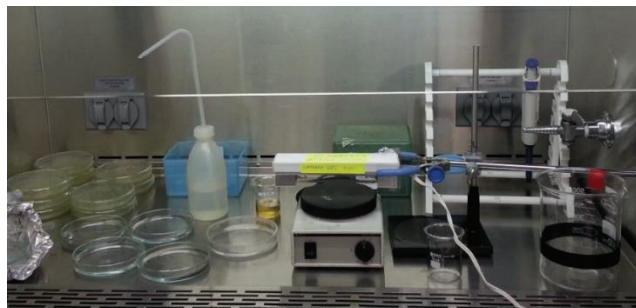
En la Figura 3.12a, se muestra un esquema del ataque combinado. La prueba se llevó a cabo, tomando 20 mL de solución con una concentración de  $41 \text{ mg L}^{-1}$  de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> generado electroquímicamente. A esta, se agregó 1 mL de solución con bacterias sin diluir ( $N_{\text{UFC}}$  igual a  $1.08 \times 10^7 \text{ UFC } 100^{-1} \text{ mL}^{-1}$ ) como se muestra en la Figura 3.13c. La solución con bacterias inmediatamente fue irradiada por 2, 4, 5 y 6 minutos (Figura 3.12d). El ataque a las bacterias con UV-c y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> fue simultáneo. Para finalizar, se

extrajo 1 mL de solución irradiada, la misma que fue colocada por vertido en placas de Petri con agar nutriente (Figura 3.12e) e incubada por 24 horas a 35 °C.

**FIGURA 3.122: EQUIPOS Y PROCEDIMIENTO UTILIZADO PARA LA PRUEBA COMBINADA UV-c + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**



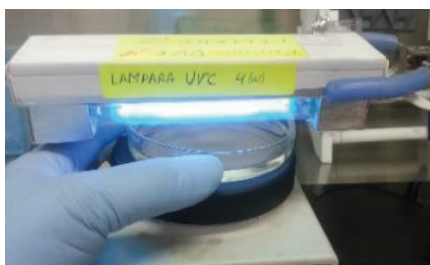
a)



b)



c)



d)



e)

ELABORADO POR: Wilber Guamán



## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS

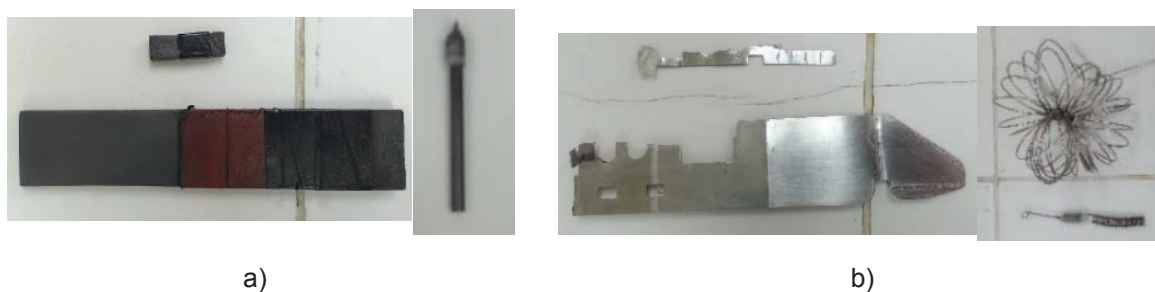
Durante el desarrollo del proyecto, se llevaron a cabo pruebas preliminares que ayudaron a determinar los factores que intervinieron en la producción de  $H_2O_2$ ; se analizaron las características y la relación de estos en la generación.

#### 4.1 ANÁLISIS DE ELECTRODOS Y CONTRAELECTRODOS

Entre las pruebas realizadas para la selección del electrodo de trabajo y contraelectrodo estuvieron: la medición de la resistencia eléctrica del material, cuyos resultados se encuentran en la Tabla 4.1 y la realización de voltametrías cíclicas que se muestran en la Figura 4.2.

En la Figura 4.1a se muestra, un bloque de grafito para electroremoción y un cilindro de carbón núcleo de pila, que fueron propuestos como electrodos de trabajo. En la Figura 4.1b, se encuentran los contraelectrodos, placa de acero inoxidable común (AISI 300) y alambre aleado con Cr-Ni (Morelli).

**FIGURA 4.1: ELECTRODOS Y CONTRAELECTRODOS**



ELABORADO POR: Wilber Guamán

La resistencia eléctrica de los electrodos a emplear en la producción de  $H_2O_2$ , fue medida a una separación de 5 mm. Los resultados se encuentran tabulados en la Tabla 4.1, e indican que el juego Carbón / Acero Cr-Ni ofrece la menor resistencia al paso de corriente. Sin embargo, el electrodo de carbón es más costoso y de difícil adquisición.

**TABLA 4.1: RESISTENCIA ELÉCTRICA DE ELECTRODOS Y CONTRAELECTRODOS**

	Grafito	Carbón	Fibra de carbón activado	Acero Inoxidable	Acero Cr-Ni
Resistencia (ohmios)	1.7	1.3	3200	1.3	0.9

ELABORADO POR: Wilber Guamán

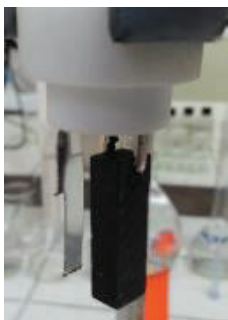
A continuación, en la Figura 4.2 se muestran voltametrías cíclicas llevadas a cabo en una celda con 20 mL de  $HNO_3$  0.2 M, para el análisis de electrodos y contraelectodos. En la Figura 4.2a, se observa el resultado de la VC realizada a los electrodos de trabajo. El área sumergida, de los electrodos de trabajo de grafito y carbón, fue la misma para los dos con un valor de  $172 \text{ mm}^2$ , mientras que, el área del contraelectrodo de acero inoxidable (lamina) fue  $272.5 \text{ mm}^2$ .

En las curvas se puede observar, que una mayor área (en el interior de la gráfica) fue generada por el electrodo de grafito. El área del electrodo de grafito, sobre el área del electrodo de carbón tuvieron una relación de 526 a 163, lo que indica que hubo una potencia consumida de 3.22 veces mayor al emplear el grafito comercial (electroremoción) en relación al de carbón, para realizar el proceso de oxidación o reducción.

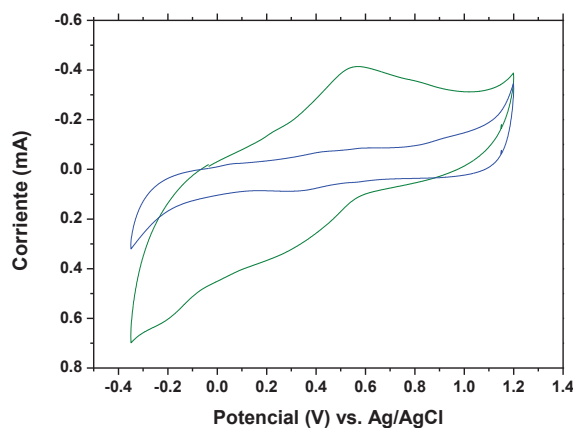
En la Figura 4.2b, se muestra la prueba para los contraelectrodos. En esta, se utilizó el electrodo de grafito como cátodo, y se intercambiaron los contraelectrodos de acero inoxidable con el alambre de acero con aleación Cr-Ni en cada prueba. El resultado de

las voltametrías cíclicas realizadas, muestra una igualdad entre los dos materiales. Por lo tanto, se puede trabajar con cualquiera de los dos sin mayor inconveniente.

**FIGURA 4.2: VOLTAMETRÍAS CÍCLICAS DE ELECTRODOS Y CONTRAELECTRODOS EN  $\text{HNO}_3$  0.2 M**

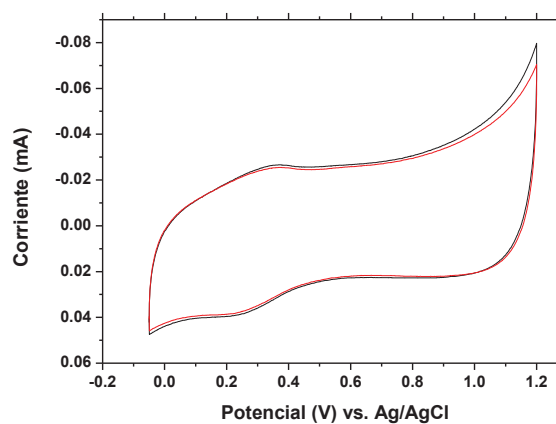


**Diferentes materiales del electrodo de trabajo**



a)

**Diferentes materiales de contraelectrodos**



b)

- a) Grafito para electroremoción —, Carbón núcleo de batería —  
 b) Lamina acero inoxidable —, Acero Cr-Ni —. Área del electrodo  $0.172 \text{ cm}^2$ .

ELABORADO POR: Wilber Guamán

En otra prueba, se analizó la resistencia mecánica de los electrodos de carbón y grafito obteniéndose como resultado que la barra de carbón cilíndrica (núcleo de batería) presenta un mayor desgaste a la abrasión que la barra de grafito (para electroremoción) cuadrada. La relación de desgaste está en proporción de 5:1 respectivamente.

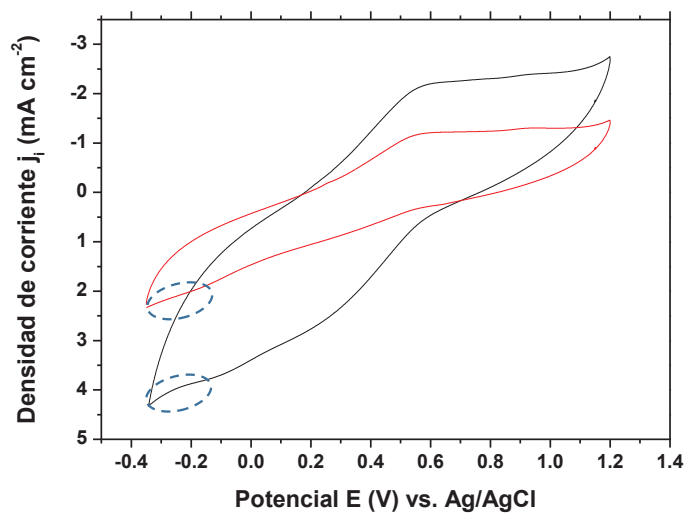


Aunque la barra de carbón, presenta mejores características para la generación de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , se elige como electrodo de trabajo el de electroremoción por su bajo costo, fácil reposición y mejor resistencia al desgaste. Como contraelectrodo, se utilizó el de alambre Cr-Ni para la celda simple y el de lámina (AISI 300) para la celda tipo H, debido a que el alambre de Cr-Ni es poco maleable y dificulta el conformado para ser colocado en la celda.

## 4.2. VOLTAMETRÍAS DIFERENTES MEDIOS DE TRABAJO

En la Figura 4.3, se presenta los resultados de voltametrías realizadas en medio ácido  $\text{HNO}_3$  0.2 M, volúmenes de 20 mL y área del electrodo de grafito  $172 \text{ mm}^2$ . Una solución fue saturada con aire (línea negra) y otra saturada con nitrógeno (línea roja) por 15 minutos a razón de  $25 \text{ mL s}^{-1}$ . Como se puede observar, en el área marcada con puntos la pendiente de reducción del oxígeno a  $\text{H}_2\text{O}_2$  (ver Figura 2.6, Zona I) se modificó notablemente, debido a que las moléculas de nitrógeno más pequeñas desplazan al oxígeno del medio dejando una mínima posibilidad para la generación de  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

**FIGURA 4.3: VOLTAMETRÍAS CÍCLICAS DE  $\text{HNO}_3$  CON  $\text{N}_2$  Y CON AIRE**



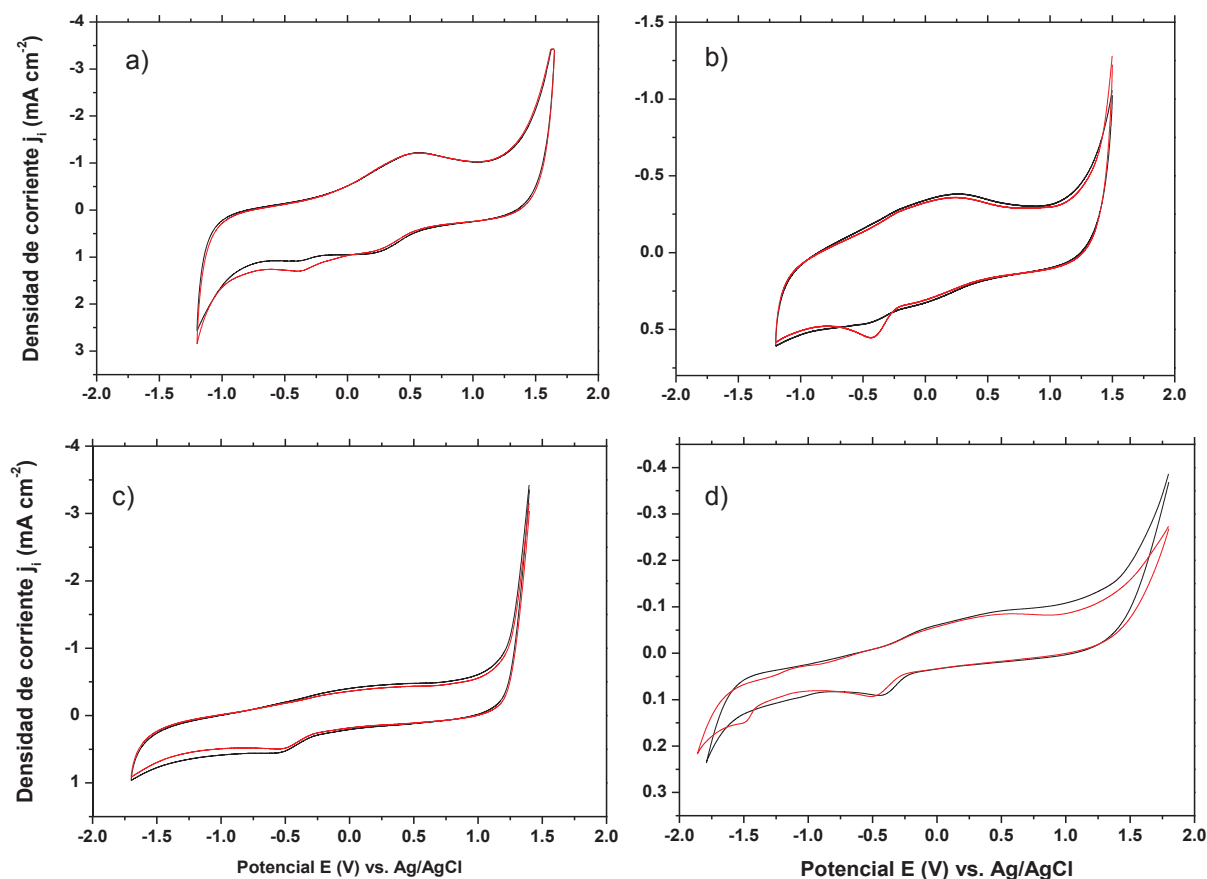
Saturado con aire — , Saturado con nitrógeno —

ELABORADO POR: Wilber Guamán

La Figura 4.4, muestra voltamperometrías cíclicas realizadas en los medios: ácido  $\text{HNO}_3$  (pH 1), neutro  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (pH 7), alcalino 50%  $\text{NaHCO}_3$  2 M + 50%  $\text{NaOH}$  0.2 M (pH 12) y agua no tratada (pH 7), saturados con aire y no saturados. El cambio de pendiente, que se produce alrededor de los -0.5 V (vs. Ag/AgCl) en todos los medios, principalmente en los saturados, indica el proceso de reducción del oxígeno.

Para estas pruebas, se empleó como electrodo de trabajo carbón vitreo con un área sumergida de  $7.07 \text{ mm}^2$  y como contraelectrodo grafito. El volumen de solución para todos los medios fue de 40 mL. La saturación con aire, fue realizada por 15 minutos a razón de  $25 \text{ mL s}^{-1}$  a través de una piedra porosa.

**FIGURA 4.4: VOLTAMETRÍAS CÍCLICAS PARA DISTINTOS MEDIOS**

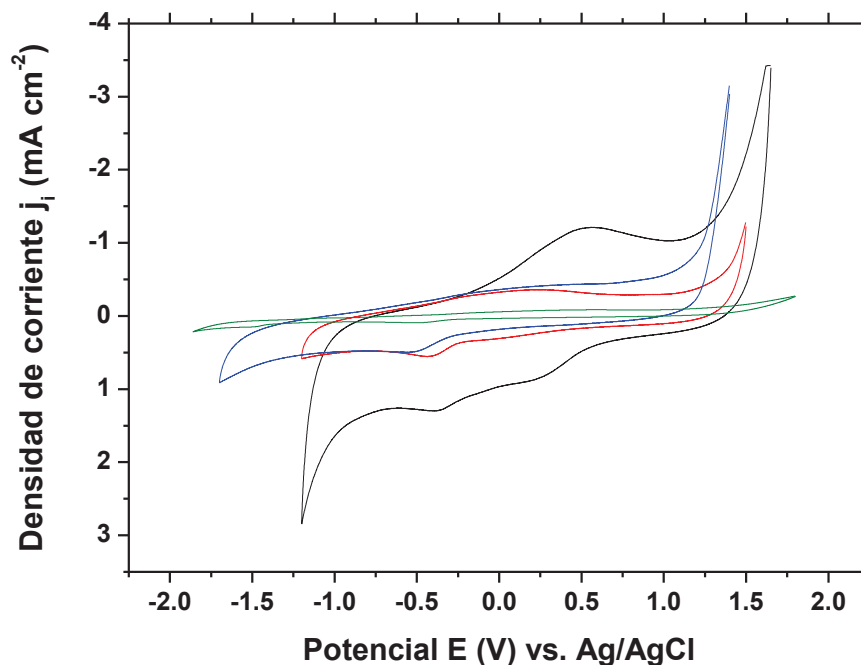


Soluciones aireadas — y sin airear — para los medios: a) Ácido, b) Neutro, c) Alcalino, y d) Agua entubada.

ELABORADO POR: Wilber Guamán

En la Figura 4.5, se recogen las voltametrías cíclica de todos los medios aireados.

**FIGURA 4.5: VOLTAMETRÍAS CÍCLICAS DE TODOS LOS MEDIOS**



Medio ácido —, medio neutro —, medio alcalino —, y agua entubada —.

ELABORADO POR: Wilber Guamán

De todos los medios saturados en aire, el que posee la pendiente menos pronunciada es el agua. La pendiente se relaciona directamente con el proceso de reducción del oxígeno a peróxido de hidrógeno. A una menor pendiente, la producción requiere una mayor cantidad de energía comparado con los otros. Sin embargo, como se puede observar en la Figura 4.5, el intervalo de densidad de corriente en la curva fue el más bajo de todos.

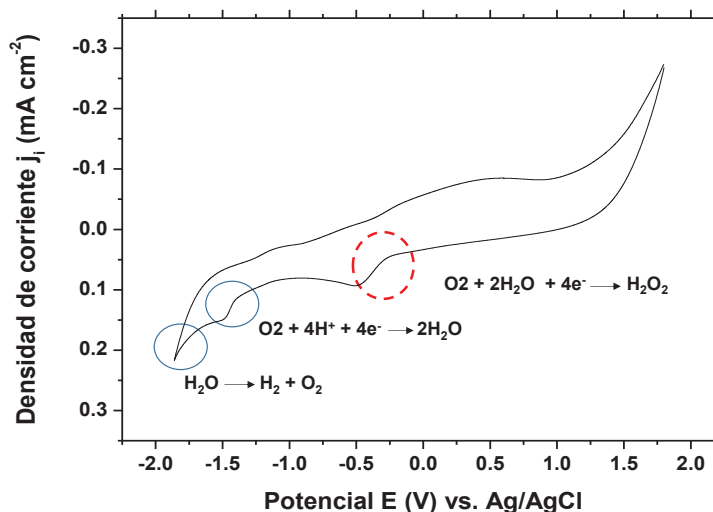
Las curvas corridas hacia la derecha del potencial cero, indican que se necesitó menor energía para la activación de los medios ácido y alcalino. Esto se puede observar con mayor claridad en la Figura 4.7.

### 4.3 CINÉTICA DEL PROCESO

#### 4.3.1 VOLTAMPEROMETRÍA CÍCLICA Y DE BARRIDO LINEAL CON ELECTRODO DE DISCO ROTATORIO

En la Figura 4.6, se muestra en línea entrecortada de color rojo la zona en la que se realizó las LSV, con electrodo de disco rotatorio a diferentes velocidades. Esto se realizó, para el análisis de la cinética de la formación de  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

**FIGURA 4.6: VOLTAMETRÍAS CÍCLICAS DEL AGUA NO TRATADA**

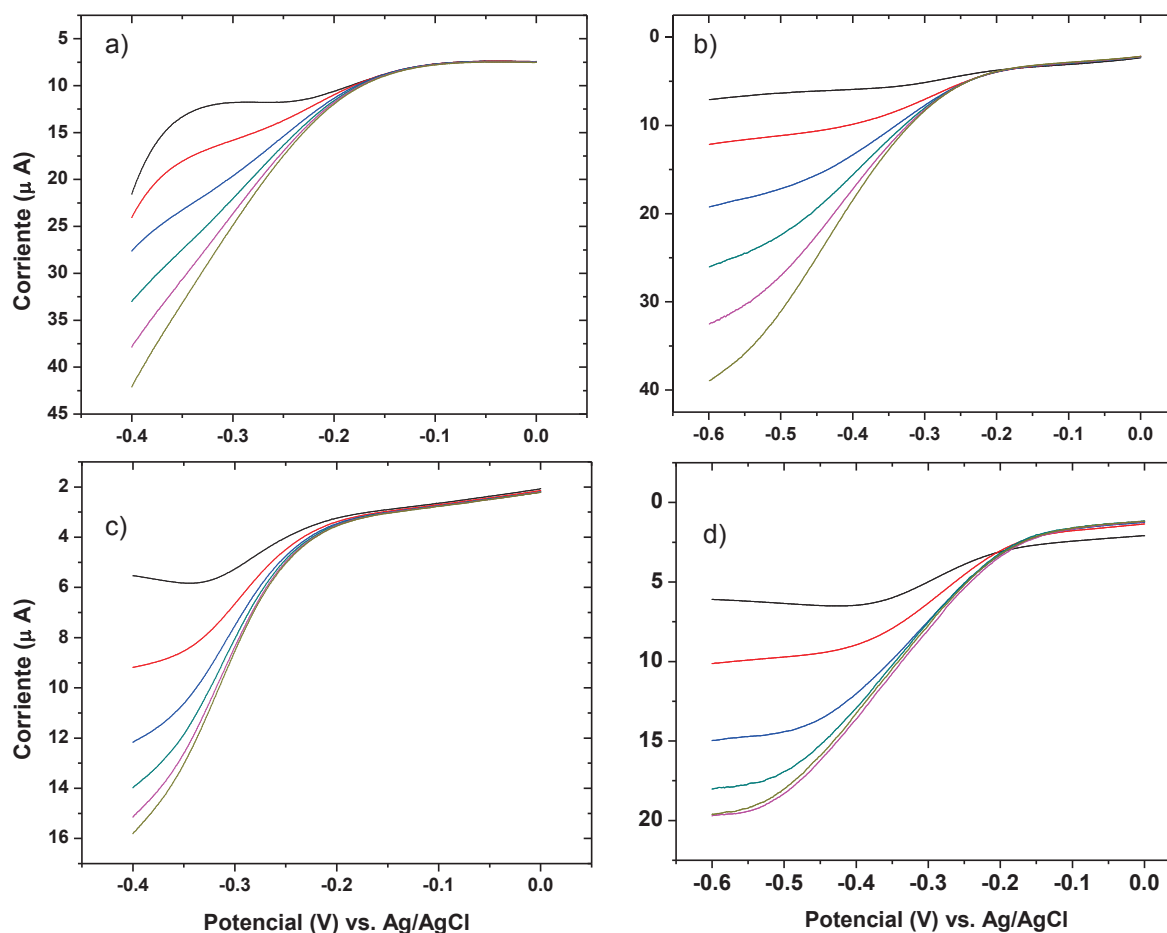


ELABORADO POR: Wilber Guamán

El cambio de pendiente de la curva que se muestra en rojo, indica donde el oxígeno del aire fue reducido a peróxido de hidrógeno. La prueba se realizó con un volumen de 40 mL previamente aireado a razón de  $25 \text{ mL s}^{-1}$  por 20 minutos. El electrodo de trabajo fue carbón vítreo con un área sumergida de  $7.07 \text{ mm}^2$ .

Con el electrodo de disco rotatorio y el valor de potenciales de reducción del oxígeno determinados en el paso anterior, se generan las voltametrías de barrido lineal para cada medio a diferentes velocidades de giro del disco rotatorio. La velocidad de barrido fue de  $0.15 \text{ V s}^{-1}$ . Los resultados se exponen en la Figura 4.7.

**FIGURA 4.7: VOLTAMETRÍAS DE BARRIDO LINEAL PARA DIFERENTES MEDIOS**



Velocidades de rotación del electrodo en rpm: 0 —, 100 —, 400 —, 900 —, 1600 — y 2500 —.  
 a) Medio ácido, b) medio neutro, c) medio alcalino, y d) agua entubada.

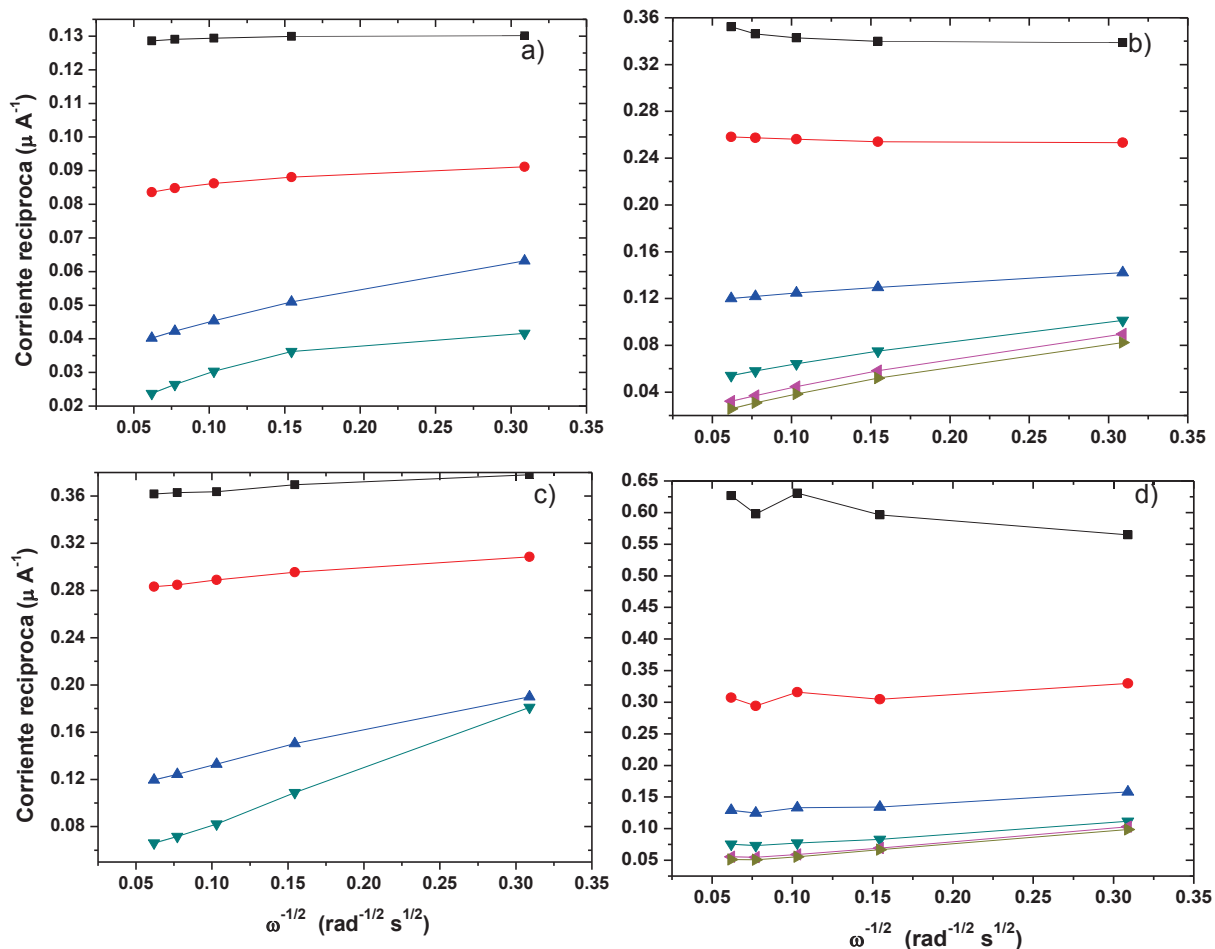
ELABORADO POR: Wilber Guamán

Las curvas generadas, permiten saber que para el medio ácido y alcalino la reacción tendrá una cinética rápida, mientras que para el medio neutro y el agua la reacción será lenta, pues el potencial en donde empieza el fenómeno de transferencia de masa (final inferior de la curva) se encuentra a los -0.6 V b) y d), comparada con los -0.4 V de a) y c). La consecuencia de esto, es que para la reacción de reducción del  $O_2$  a  $H_2O_2$  se debió aplicar potenciales mayores a cinéticas lentas para lograr la transferencia de electrones.

### 4.3.2 APLICACIÓN DE LA RELACIÓN DE KOUTECKY-LEVICH

El tratamiento de los datos, mediante la ecuación de Koutecky-Levich ayudó a encontrar los elementos que intervienen en la determinación de las variables cinéticas del proceso de reducción del  $O_2$  a  $H_2O_2$ . Para esto, se elaboraron gráficas entre la corriente recíproca  $i_l$  y el inverso de la raíz cuadrada de la velocidad angular  $\omega^{-1/2}$  (Figura 4.8). Cada curva corresponde a un potencial  $E^*$ . Este proceso permitió linealizar los datos.

**FIGURA 4.8:**  $\omega^{-1/2}$  vs.  $i_l^{-1}$  ( $E^*_1$  A  $E^*_{301}$ )



Potenciales para cada curva:  $E^*_1$  -0.1 V  $\blacksquare$ ,  $E^*_2$  -0.2 V  $\bullet$ ,  $E^*_3$  -0.3 V  $\blacktriangle$ ,  $E^*_4$  -0.4 V  $\blacktriangledown$ ,  $E^*_5$  -0.5 V  $\blacktriangleleft$ ,  $E^*_6$  -0.6 V  $\blacktriangleright$ . a) Medio ácido, b) medio neutro, c) medio alcalino, y d) agua entubada.

ELABORADO POR: Wilber Guamán

Para cada una de las curvas, se tiene un valor de corriente cinética determinada por el corte con el eje de las ordenadas, esta corriente es dividida para el área del electrodo de trabajo que se encuentra en contacto con la solución de forma que se obtiene la densidad de corriente cinética ( $j_k$ ).

#### 4.3.3 APLICACIÓN DE LA RELACIÓN DE TAFEL

Para determinar los parámetros cinéticos, se aplica la ecuación de Tafel (Ec. 2.17), misma que relaciona el sobrepotencial con el logaritmo de la corriente cinética antes encontrada.

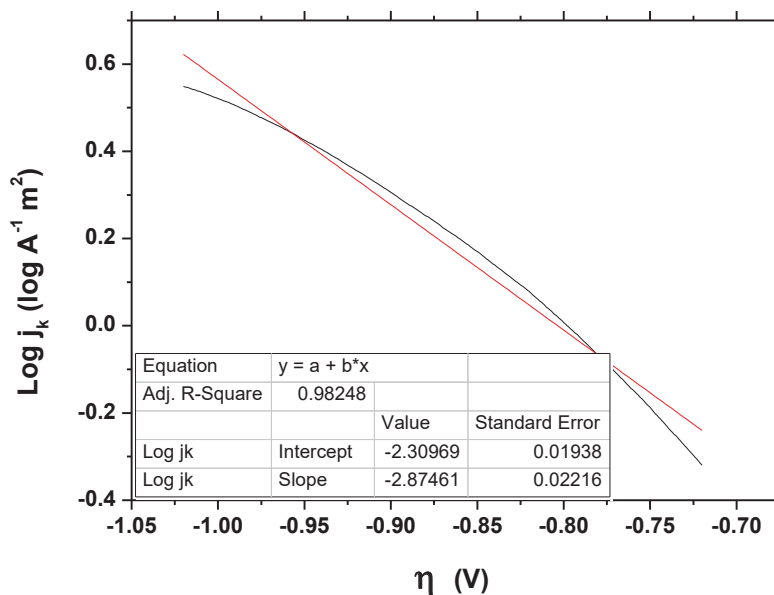
A continuación, el sobrepotencial en el que se incluye el potencial del electrodo de referencia con respecto al electrodo de hidrógeno 0.205 V y el valor de potencial estándar de reducción de  $O_2$  a  $H_2O_2$  es 0.68 V.

$$\eta = E^* - 0.68 + 0.205 \text{ (V)}$$

De esta nueva linealización, se encuentra la pendiente con la que se determina el coeficiente de transferencia  $\alpha$  y el valor de la intersección con el eje  $\text{Log } j_k$ , que lleva a determinar el valor de la corriente de intercambio.

Como un ejemplo realizado para el agua entubada, se presenta el proceso de linealización entre el sobrepotencial y el  $\text{Log } j_k$ . De forma similar se han realizado las operaciones para los otros medios.

**FIGURA 4.9: LINEALIZACIÓN ENTRE  $\eta$  Y  $\text{Log } j_k$**



ELABORADO POR: Wilber Guamán

Los valores encontrados para el agua no tratada son:  $j_0$  igual a  $-4.9 \times 10^{-7}$  A  $\text{cm}^{-2}$  y  $\alpha$  igual a 0.1658. Estos resultados son llevados a la Tabla 4.2, en donde también se presentan los parámetros cinéticos de los otros medios.

**TABLA 4.2: PARÁMETROS CINÉTICOS**

	Medio			
	HNO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Alcalino	Agua entubada
$j_0$ (A $\text{cm}^{-2}$ )	1.58E-07	1.72E-08	5.59E-09	4.90E-07
$\alpha$	0.20	0.23	0.26	0.17
E (v) Ag/AgCl	-0.35	-0.3	-0.28	-0.75
Electrones	2	2	2	2

ELABORADO POR: Wilber Guamán

El valor de  $\alpha$ , es una medida de la simetría de la energía de barrera. Esto, se refiere a la dificultad para que se lleve a cabo el proceso de reducción. Un  $\alpha$  igual a 0.5, indica



que la reacción de óxido-reducción está en equilibrio. Entonces, para valores menores de  $\alpha$  (todos los medios) la energía de barrera para activar la reducción es alta. Comparando los valores de potencial, para el medio ácido ( $\alpha$  igual a 0.2) y agua ( $\alpha$  igual a 0.17), se observa que la mejor producción de  $\text{H}_2\text{O}_2$  fue en medio ácido a un valor de voltaje menor a 1 voltio, mientras que en agua la mejor producción se tuvo a un valor de voltaje superior a 1 voltio (Ver Anexo No 6).

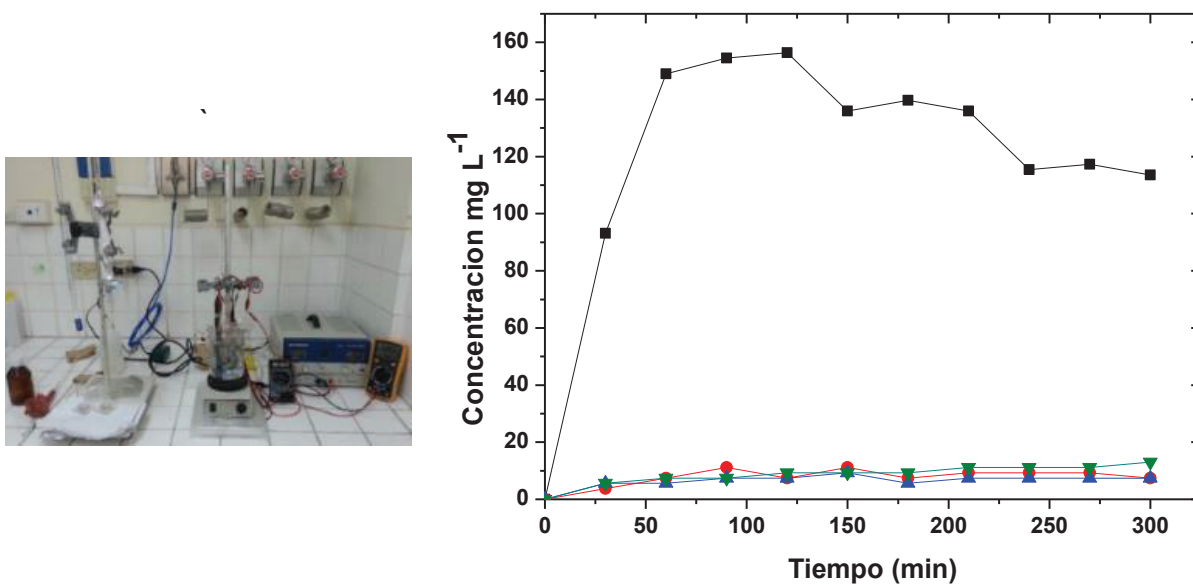
En cuanto, al valor de densidad de corriente ( $j_0$ ) que se refiere a la velocidad de intercambio de electrones, se observa una mayor facilidad de este proceso en medio ácido que en el agua, la relación entre las densidades de corrientes fue de 2.5 veces mayor para el ácido. Sin embargo, la corriente que se aplicó para el agua fue pequeña del orden de los 30 mA que es baja comparada con el medio ácido que requirió de corrientes de hasta 1.5 A. Esto se debió principalmente a la disponibilidad de iones que ofreció el medio.

La corriente de intercambio, se relaciona con la transferencia de electrones y por tanto se tendrá mayor producción de peróxido de hidrogeno en medio ácido como se puede constatar en el Anexo No 6.

#### **4.4 GENERACIÓN DE $\text{H}_2\text{O}_2$ EN CELDA SIMPLE**

Después de verificar la factibilidad de generación del  $\text{H}_2\text{O}_2$  mediante el estudio de la cinética del proceso, se realizó la producción en una celda simple con diferentes medios (Ver apartado 3.3.4). Dando como resultado que la mayor generación, se obtiene en solución ácida  $\text{HNO}_3$  en un tiempo de 100 minutos. La producción de los otros medios alcanza un 10% con respecto al medio ácido. A continuación, la Figura 4.10 presenta las curvas de producción para los diferentes medios.

**FIGURA 4.10: CURVAS DE GENERACIÓN DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> EN VARIOS MEDIOS**



Medio ácido ■, medio neutro ●, medio alcalino ▲ y agua no tratada ▼.

ELABORADO POR: Wilber Guamán

En la Tabla 4.3, se muestran las condiciones de voltaje y corriente que fueron aplicadas para obtener la máxima producción en cada medio.

**TABLA 4.3: PARÁMETROS DE GENERACIÓN PARA CADA MEDIO**

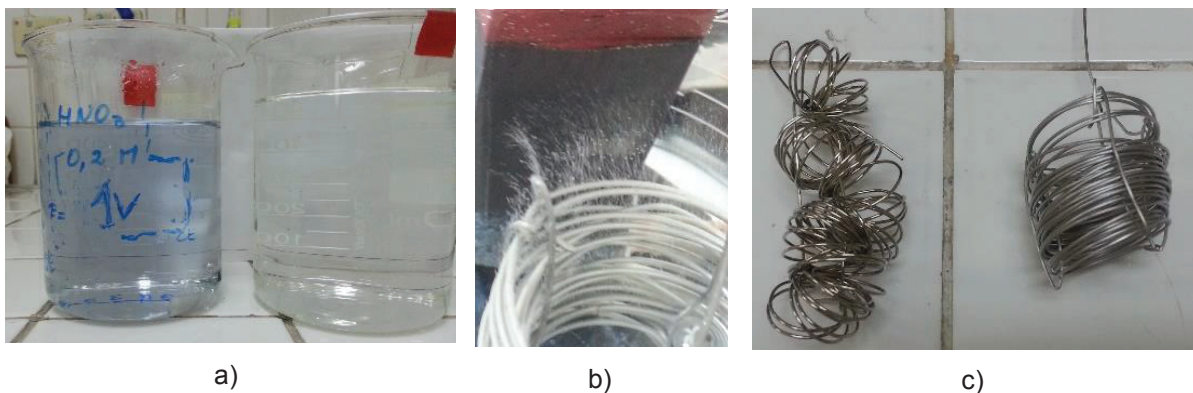
	Medio			
	Ácido	Neutro	Alcalino	Agua entubada
Voltaje (V) vs. Ag/AgCl	1	0.6	0.9	1.3
Corriente (mA)	1.05	7	10.5	13.6
Densidad de Corriente (mA cm <sup>-2</sup> )	0.26	1.75	2.63	3.4
Concentración (mg L <sup>-1</sup> )	156.42	11.17	9.31	13.04
Tiempo requerido (min)	120	90	150	300

ELABORADO POR: Wilber Guamán

Como se puede observar, la máxima producción de  $\text{H}_2\text{O}_2$  se dio en el medio ácido como fue previsto por la cinética de la reacción. La disponibilidad del hidrógeno en este medio también ayudó al proceso de generación.

En la Figura 4.11a, se observa que en medio ácido a partir de los 1000 mV, empieza a oxidarse el cromo y desprenderse del alambre. La solución se torna de un color azulado. Para valores superiores a este voltaje, es considerable el desprendimiento de oxígeno del ánodo (Figura 4.11b) que estuvo constituido por alambre de Cr–Ni y perdió su brillo (Figura 4.11c). Además, se observa (Ver Anexo No 6) que a 1000 mV la producción de peróxido de hidrógeno empieza a decaer a partir de los 100 minutos desde una tasa de  $160 \text{ mg L}^{-1}$ . En el Anexo No 6, se presentan otras curvas de producción.

#### FIGURA 4.11: CONSECUENCIAS DE POTENCIALES SUPERIORES A 1000 mV



ELABORADO POR: Wilber Guamán

En el grupo de curvas del Anexo No 6, también se incluye la producción de peróxido de hidrógeno con dos diferentes disposiciones geométricas de los contraelectrodos. Como se puede observar, en las Figuras (c) y (d) la producción es similar para las dos configuraciones, la disposición del contraelectrodo no afecta en gran medida las cantidades de  $\text{H}_2\text{O}_2$  generadas.

## 4.5 GENERACIÓN DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO EN CELDA H

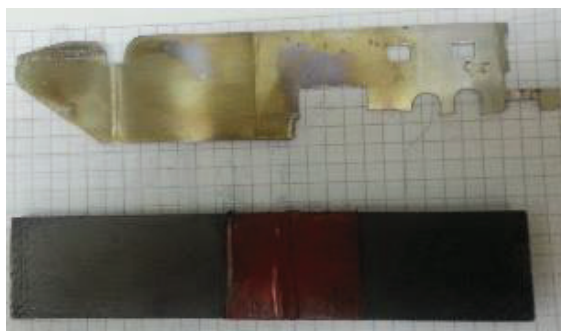
Con el fin de evitar la degradación del  $H_2O_2$  en el ánodo, mejorar la eficiencia de producción y con la finalidad de aplicar esta metodología para la desinfección de agua de consumo humano, se procede a realizar la generación en una celda tipo H.

Como paso previo a la producción, se elaboró una membrana compuesta por *agarosa* y solución de KCl 0.5 M, la misma que separa las celdas y al mismo tiempo permite el paso de los iones para mantener la circulación de la corriente (flujo de electrones) en el sistema (Ver apartado 3.3.5.1 construcción de la membrana).

Uno de los principales inconvenientes que surgió en desarrollo de este proyecto, fue la construcción de la membrana. Esta presentó heterogeneidad y poca resistencia mecánica. En la Figura 4.12a, se puede observar el resultado del movimiento de los iones de cloruro, hacia el ánodo. Estos, se depositaron sobre la placa de acero inoxidable.

La membrana fabricada con 1.5 g de agar en 50 mL de solución de KCl 0.5M y de espesor 3mm no soportó la presión interna de la celda, fisurándose en algunas pruebas (Figura 4.12b).

**FIGURA 4.12: GENERACIÓN DE  $H_2O_2$  EN CELDA TIPO H**



a)

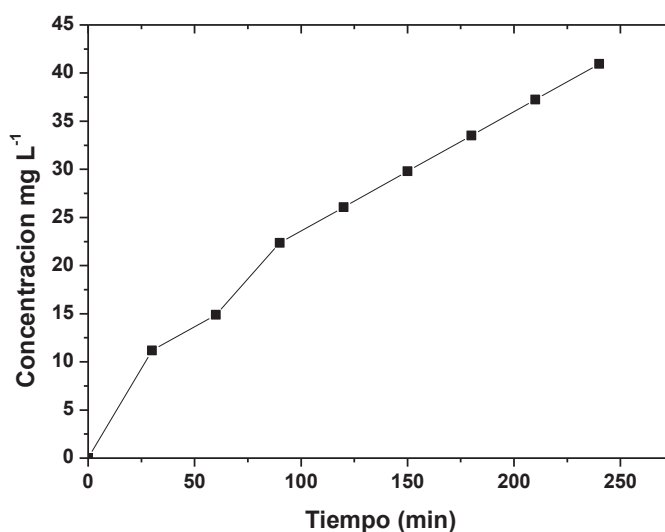


b)

ELABORADO POR: Wilber Guamán

Las pruebas de generación en la celda tipo H, fueron llevadas a cabo con la membrana antes indicada, pues no fue posible mejorar sus características. A continuación, se presenta la mejor curva de generación de peróxido de hidrógeno en agua entubada.

**FIGURA 4.13: CONCENTRACIÓN DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> GENERADO EN CELDA TIPO H**

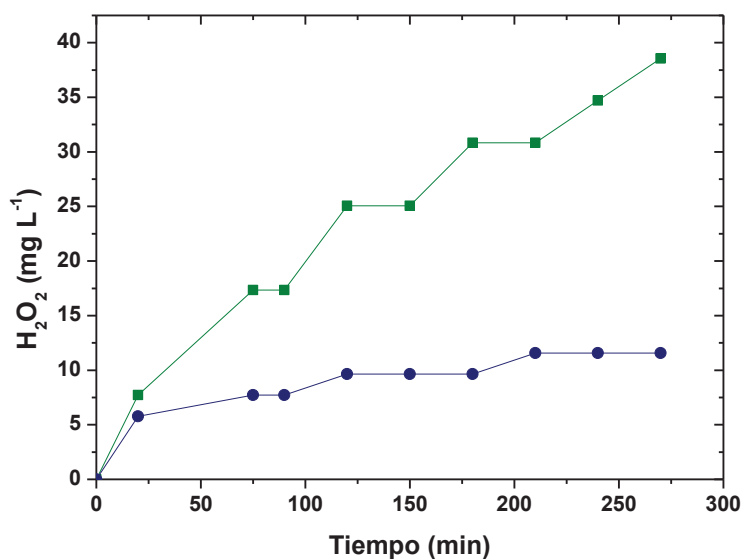


ELABORADO POR: Wilber Guamán

Las condiciones de trabajo para la mejor producción de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> fueron: tiempo de generación 240 minutos a un potencial de 800 mV (vs. Ag/AgCl), circulando una corriente de 6.2 mA ( $j_i = 1.55 \text{ mA cm}^{-2}$ ). La celda que contenía el electrodo de trabajo fue aireada constantemente a razón de  $25 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$  con ayuda de la piedra porosa. Obteniéndose un valor máximo de  $41 \text{ mg L}^{-1}$ , en 240 minutos. En el Anexo No 7, se encuentran otras curvas de generación a diferentes valores de potencial.

En la Figura 4.14, se presentan las curvas de producción de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en agua entubada, tanto en la celda simple como en la celda tipo H. Como se puede observar, la producción se incrementa en 3.15 veces al usar la celda dividida. Esto se debió, a que el peróxido producido por reducción en el cátodo se mantiene aislado, evitando que se oxide en la celda que contiene el ánodo.

**FIGURA 4.14: CURVAS DE GENERACIÓN DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> EN CELDA SIMPLE Y EN TIPO H**



Celda simple ●, Celda tipo H ■.

ELABORADO POR: Wilber Guamán

Con el propósito de comparar el efecto que tiene la generación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en el agua entubada, se realiza la caracterización de esta antes y después (Tabla 4.4).

**TABLA 4.4: CARACTERIZACIÓN DEL AGUA ANTES Y DESPUÉS DE LA GENERACIÓN DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

	Agua antes del proceso (mg L <sup>-1</sup> )	Agua después del proceso (mg L <sup>-1</sup> )
Hierro total	0.02	0.02
Manganeso	0.019	--
Níquel	0	--
Zinc	0.17	--
Calcio	18	8
Magnesio	6	--
Sulfatos	0	0
Nitratos	< 2	< 2
Fosfatos	0.52	0.42
Cloruros	< 5	--
Demanda química de oxígeno (DQO)	2	--
Sólidos totales	180	--
Sólidos suspendidos	< 10	--
Sólidos disueltos	196	1112
Conductividad	180 μs cm <sup>-1</sup>	221 μs cm <sup>-1</sup>
pH	6.01	7

- No se mide por tener valores iniciales demasiado bajos

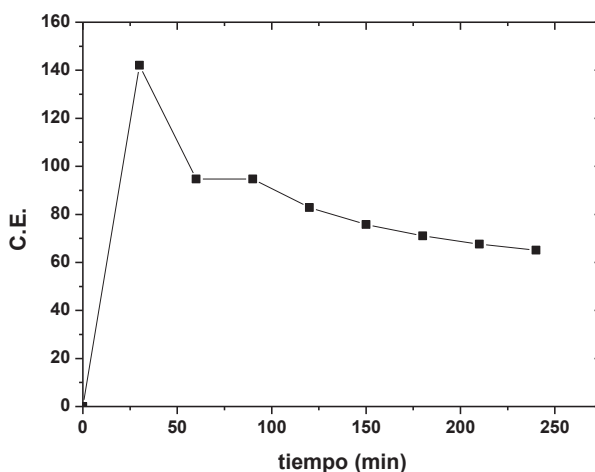
ELABORADO POR: Wilber Guamán

Los valores, muestran una disminución del calcio en un 44.4% y del fosfatos en un 21.8%, mientras que se registra un incremento del 22.8% en la conductividad y un 467.3% en los sólidos disueltos. Al parecer, parte de la membrana compuesta por *agarosa* se dirigió hacia al cátodo, lo que incrementó el mencionado valor.

#### 4.6 RENDIMIENTO DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

El rendimiento (C.E.), es calculado con la Ecuación 2.19 para los siguientes valores: n igual a 2, F igual a 96485 C mol<sup>-1</sup>, V tiene un valor de 250 mL igual a 0.250 L, i es 6.2 mA. La concentración y el tiempo son tomados de la Figura 4.12, en la que se muestra la relación entre estos parámetros. Los cálculos, fueron realizados en intervalos de 30 minutos hasta llegar a los 240 minutos que duró la prueba. El potencial para la generación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, fue 0.8 V (vs. AgCl/Cl) con una densidad de corriente de 1.55 mA cm<sup>-2</sup>.

**FIGURA 4.15: EFICIENCIA DE LA PRODUCCIÓN DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> EN FUNCIÓN DEL TIEMPO**



ELABORADO POR: Wilber Guamán

En la Figura 4.15, se observa como la eficiencia al inicio del proceso se incrementa notablemente, llegando a un valor de 142.04% en los primeros 30 minutos. Esto se debió a la disponibilidad de oxígeno en el agua. A medida que avanza el proceso de reducción, la transferencia de electrones es menor, por lo tanto, la eficiencia decrece hasta 65.10% en 240 minutos. Se tiene una disminución del 76.94%.

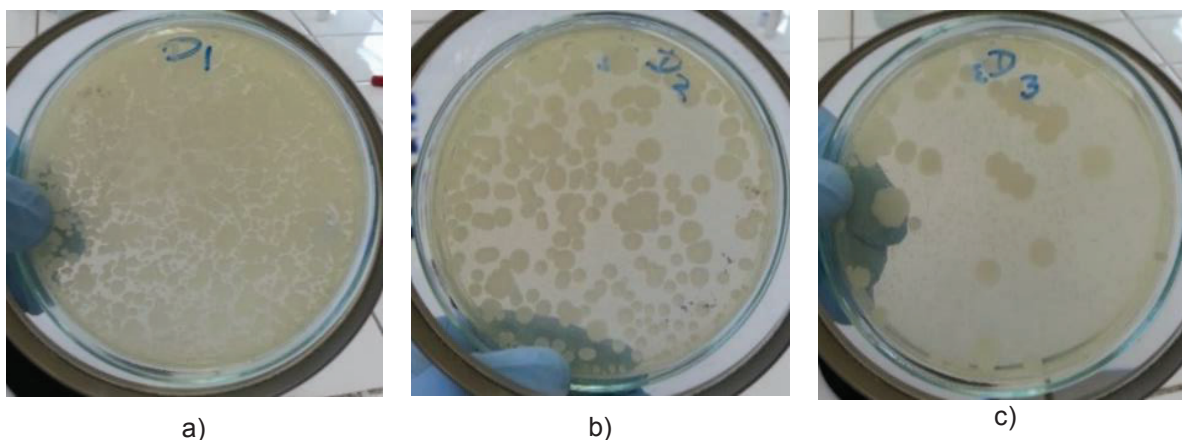
## 4.7 RESULTADO DE LAS PRUEBAS BIOLÓGICAS

### 4.7.1 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD INICIAL DE BACTERIAS

El procedimiento para la determinación de la cantidad inicial de bacterias, se encuentra detallado en el apartado 3.3.6.1.

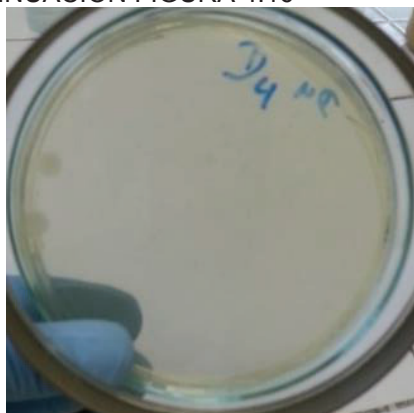
En la Figura 4.16, se muestra el resultado de la dilución y siembra de las bacterias reactivadas que fueron utilizadas en las pruebas microbiológicas. D<sub>1</sub> corresponde a la primera dilución en relación de 1 a 20, D<sub>2</sub> es la segunda dilución que correspondiente 1 a 400, D<sub>3</sub> corresponde 1 a 8 000 y D<sub>4</sub> con D<sub>4</sub>' corresponden a una dilución de 1 a 160 000.

**FIGURA 4.16: DETERMINACIÓN DEL NÚMERO INICIAL DE BACTERIAS**

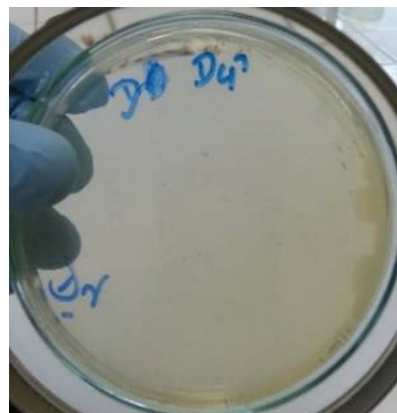




CONTINUACION FIGURA 4.16



d)



e)

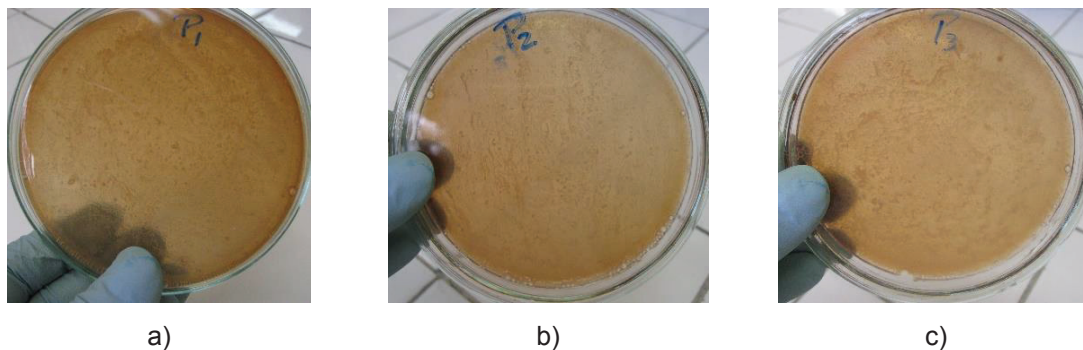
Diluciones: a)  $D_1$  1:20, b)  $D_2$  1:400, c)  $D_3$  1:8000, d) y e)  $D_4$  y  $D_4'$  1:160000

ELABORADO POR: Wilber Guamán

En la dilución  $D_3$ , el número de colonias que se contabilizó fue de 500, este valor sobrepasó lo establecido para el cálculo. En la dilución  $D_4$ , se tuvo un número total de colonias  $N_t$  igual a 69 y en  $D_4'$  se tuvo un número total  $N_t'$  igual a 66. Lo que dio un valor promedio  $N_{tp}$  igual a 67.5 colonias. El factor de concentración, 1 respecto a FD fue igual a  $160000^{-1}$ , y el volumen de la muestra MS que se tomó, fue igual a 1 mL. Con estos datos y las Ecuaciones 3.2 y 3.3, se obtuvo un número de unidades formadora de colonias  **$N_{UFC}$  igual a  $1.08 \times 10^7 \text{ UFC } 100^{-1} \text{ mL}^{-1}$** , que fue la cantidad de bacterias con las que iniciaron todas las pruebas microbiológicas.

#### 4.7.2 PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON $\text{H}_2\text{O}_2$

Luego de colocar peróxido de hidrógeno, en las concentraciones  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$  (Ver apartado 3.3.6.3), sobre cajas que contienen bacterias para tener un comparativo respecto al  $\text{H}_2\text{O}_2$  electrogenerado se observa (Figura 4.17), que no es suficiente el tratamiento que se propuso ya que en todas las cajas se tuvo crecimiento bacteriano, sobre todo en las de menor concentración.

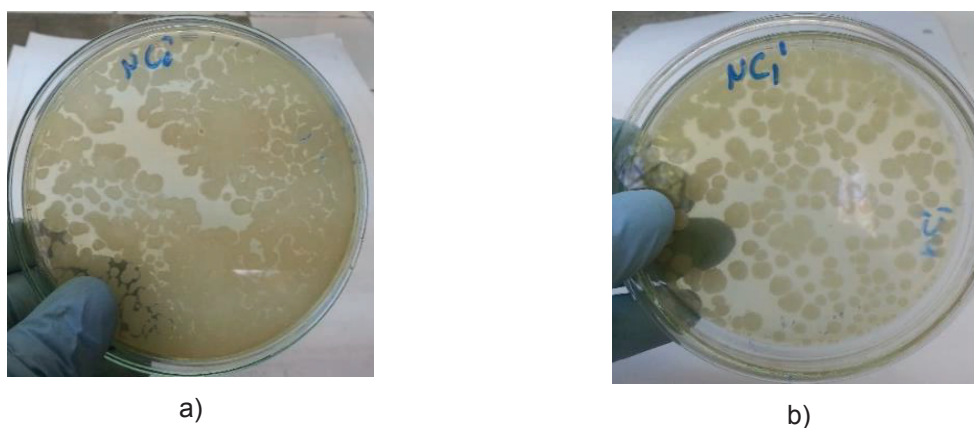
**FIGURA 4.17: RESULTADO DE LA PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

Concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: a) P<sub>1</sub> = 66 mg L<sup>-1</sup>, b) P<sub>2</sub> = 330 mg L<sup>-1</sup>, y c) P<sub>3</sub> = 825 mg L<sup>-1</sup>.

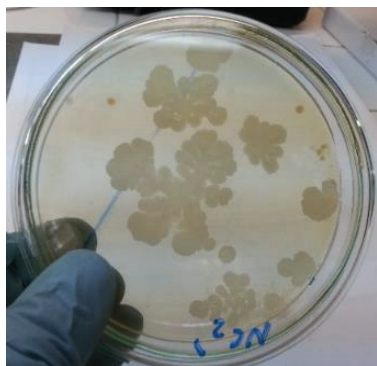
ELABORADO POR: Wilber Guamán

#### 4.7.3 PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON RADIACIÓN UV-C

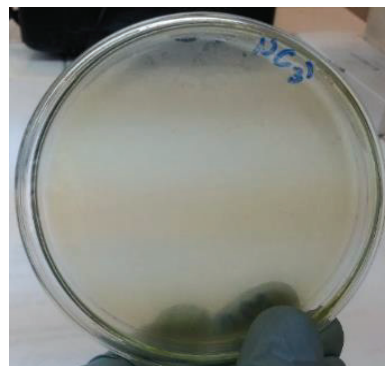
De forma independiente se realizó la desinfección de agua contaminada con bacterias, empleando únicamente radiación UV-c (Ver apartado 3.3.6.4). En esta prueba, los tiempos de irradiación para el agua contaminada con bacterias fueron: NC<sub>0</sub>' sin irradiación con tiempo cero, NC<sub>1</sub>' 2 minutos, NC<sub>2</sub>' 4 minutos y NC<sub>3</sub>' 6 minutos. Los resultados se muestran en la Figura 4.18.

**FIGURA 4.18: RESULTADO DE LA PRUEBA CON RADIACIÓN UV-c**

## CONTINUACION FIGURA 4.18



c)



d)

El tiempo de irradiación para las muestras: a)  $NC_0'$   $t_0 = 0$  min, b)  $NC_1'$   $t_1 = 2$  min, c)  $NC_2'$   $t_2 = 4$  min, y d)  $NC_3'$   $t_3 = 6$  min.

ELABORADO POR: Wilber Guamán

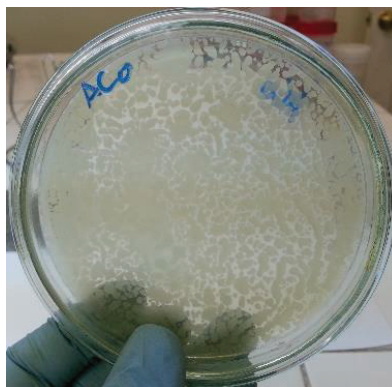
Como se puede observar, existe un crecimiento bacteriano (coliformes fecales) hasta los 4 minutos, es decir, las bacterias están sobreviviendo al tratamiento. A partir de los 6 minutos, no se tienen presencia de microorganismos.

#### 4.7.4 PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON $H_2O_2$ Y RADIACIÓN UV-C

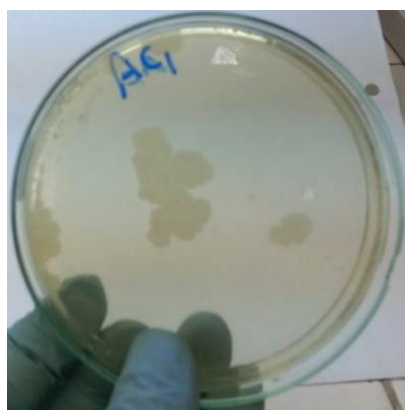
En esta prueba se observa, el efecto combinado de la radiación ultravioleta y el peróxido de hidrógeno. Sin embargo, con el fin de comparar resultados se realizó una prueba solamente con irradiación UV-c en las mismas condiciones de intensidad, tiempo y giro. Los resultados de estas pruebas se los puede ver en la Figura 4.19.

El proceso detallado, se lo describe en el apartado 3.3.6.5. Las muestras, tratadas solamente con radiación ultravioleta fueron marcadas con los códigos  $AC_1$ ,  $AC_2$ ,  $AC_3$  y  $AC_4$ , para tiempos de exposición de 2, 4, 5 y 6 minutos respectivamente. El código  $AC_0$ , se refiere a la muestra que no tuvo ningún tipo de tratamiento. Los códigos  $BC_1$ ,  $BC_2$ ,  $BC_3$  y  $BC_4$  se asignaron a las muestras que fueron tratadas con la combinación de radiación UV-c y  $H_2O_2$  electrogenerado.

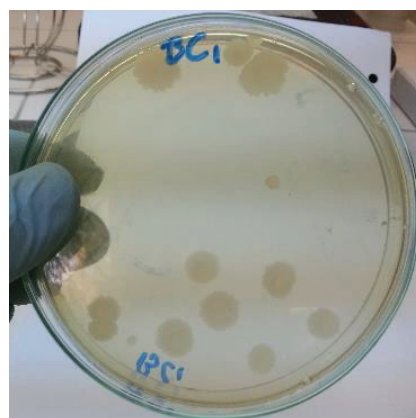
**FIGURA 4.19: RESULTADOS DE LA PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + UV-C**



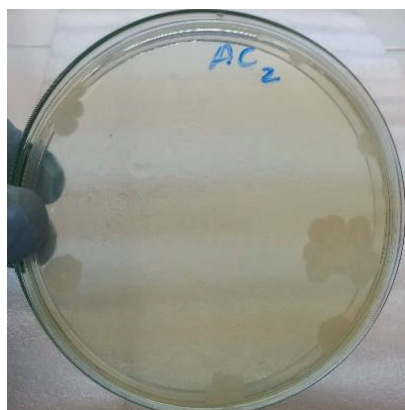
a)



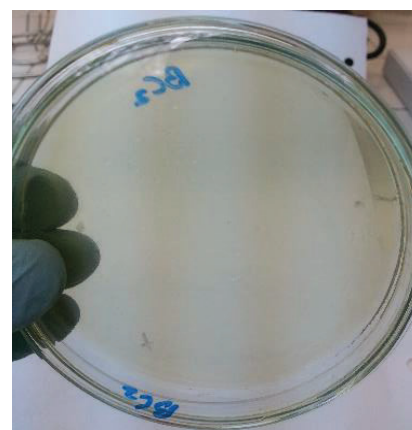
b)



b')

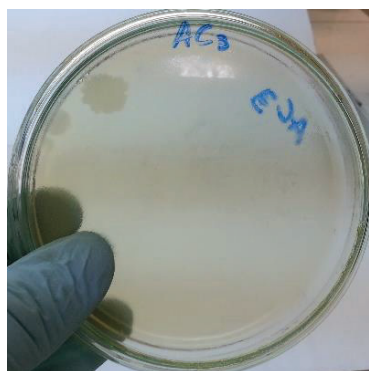


c)

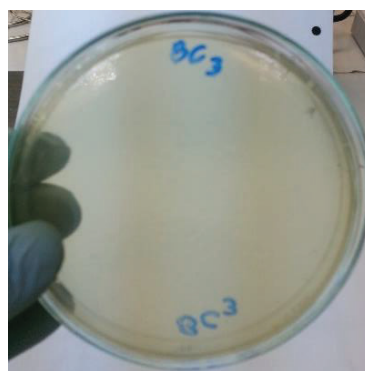


c')

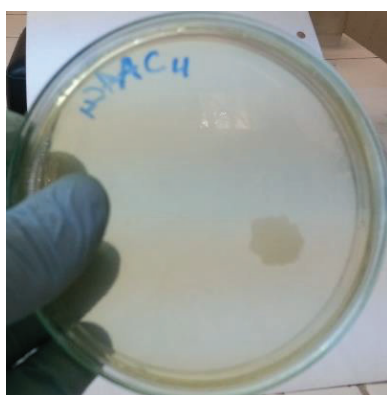
CONTINUACION FIGURA 4.19



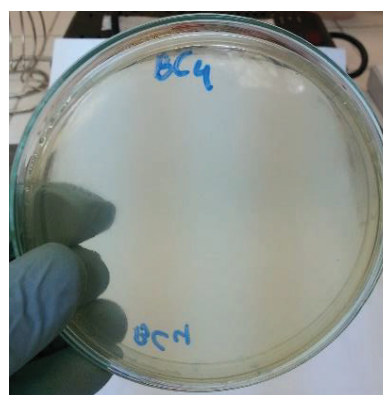
d)



d')



e)



e')

Tiempo de exposición: a)  $AC_0$  sin tratamiento, b)  $AC_1$  y b')  $BC_1$  t = 2 min, c)  $AC_2$  y c')  $BC_2$  t = 4 min, d)  $AC_3$  y d')  $BC_3$  t = 5 min, e)  $AC_4$  y e')  $BC_4$  t = 6 min.

ELABORADO POR: Wilber Guamán

Es importante observar, que con el ataque combinado se pudo disminuir el tiempo de exposición a una tercera parte de la que se necesitó cuando se aplicó a las muestras únicamente radiación para la desinfección.

El ataque combinado que genera radicales hidroxilos ( $\cdot\text{OH}$ ) por la descomposición del  $\text{H}_2\text{O}_2$ , permite tener mayor seguridad y ventaja en el proceso de desinfección, debido a la agresión que sufre el ADN por la radiación UV y oxidación por parte del radical  $\cdot\text{OH}$ . Adicional a lo antes mencionado, la membrana celular también es atacada por el peróxido de hidrógeno y radicales  $\cdot\text{OH}$  formados en el exterior de la bacteria. Por lo expuesto, se puede suponer que la gama de microorganismos inhibidos, podría ser

mayor a los que se eliminan únicamente con radiación ultravioleta (Ver Anexo No 1), pues el proceso combinado incrementa los frentes de ataque a los microorganismos.

#### **4.8 CONSUMO ENERGÉTICO**

A continuación, el análisis del consumo de energía en el proceso de desinfección. La energía eléctrica empleada para la desinfección en la prueba que emplea peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta fue la siguiente:

##### **a) Potencia eléctrica consumida por la lámpara UV-c**

La potencia de la lámpara según el fabricante fue de 4 W.

Entonces la energía consumida a un tiempo de:

- 8 minutos que fue el tiempo en el que se aseguró la desinfección solo con la lámpara ultravioleta es de 32 W-min equivalente a 0.5333 W-h.
- 4 minutos que fue el tiempo necesario para la desinfección con el proceso combinado es de 16 W-min equivalente a 0.2667 W-h.

##### **b) Potencia eléctrica consumida para la generación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

Para el cálculo de la potencia se aplicó la Ecuación 2.20, con un valor de voltaje en la fuente de 13.64 V y una corriente de  $6.2 \times 10^{-3}$  A, se tiene que la producción de peróxido de hidrógeno consumido durante 4 horas es 0.0846 W, lo que lleva a un consumo energético de 0.3384 W-h. A esto se debe sumar, el consumo de energía de la bomba de aireación. Esta tiene una potencia de 2.5 W (dato de placa), en 4 horas fue 10 W-h. Por lo que el total de la energía consumida para la desinfección con el proceso combinado fue 10.6051 W-h. Sin el empleo de la bomba, se tendría 0.6051 W-h.



Comparando el proceso de desinfección combinado con un proceso en el que se emplee solamente radiación ultravioleta, se tiene una relación de consumo de 39.76 veces más, esto se debe al gasto excesivo de energía para la aireación. En el caso de encontrar un proceso alternativo de aireación, que emplee un sistema hidromecánico o eólico-mecánico, se podría comparar entre la energía del proceso combinado y solo el proceso con radiación ultravioleta. El proceso combinado, muestra un gasto superior de energía en 1.13 veces. Sin embargo, la ventaja del proceso combinado es el ataque desde diferentes frentes que sufren los microorganismos, esto permite ampliar el rango de bacterias a ser inoculadas, además elimina la posibilidad de autoreparación.

Por otra parte, al realizar el análisis de la producción para el consumo diario de una persona que utilice 100 litros de agua al día (OMS, 2006). Se tendrá un requerimiento energético de 1.061 Kw-h con el proceso combinado; eliminando la parte electromecánica de suministro de aire el consumo es de 0.061 Kw-h, lo que se puede cubrir con un panel solar de fácil adquisición en el mercado, que posea un aporte energético medio de aproximadamente 500 Wp (Huete, 2008), (BUN-CA, 2002). Con una potencia de 300 Wp se tendrá en 4 horas 1.2 Kw-h, suficiente para generar los 100 litros por día. Sin el empleo de la bomba, con este mismo panel se podría abastecer a 20 personas al día<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> El costo promedio de un panel de 300 Wp y 24 V, a la fecha es de aproximadamente 450 USD. Dato consultado en el catálogo de la empresa Proviento S.A.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- Después de realizar los estudios para determinar los parámetros cinéticos de la reducción del  $O_2$  a  $H_2O_2$  a pH 1, 7 y 12, se obtuvo en medio ácido  $HNO_3$  0.2 M, un coeficiente de transferencia  $\alpha$  igual a 0.20 y una densidad de corriente cinética  $j_0$  igual a  $1.58 \times 10^{-7} A cm^{-2}$ , verificando la factibilidad de producción. A las condiciones de 0.8 V (vs. Ag/AgCl) y una densidad de corriente de  $j_i = 1.55 mA cm^{-2}$  se generó  $152 mg L^{-1}$  de peróxido de hidrógeno en 130 minutos. Esta es la mayor tasa de producción encontrada en este proyecto, superando en 12.31 veces al peróxido de hidrógeno generado en agua entubada, mismo que fue de  $41 mg L^{-1}$  y tuvo como parámetros cinéticos  $\alpha$  igual a 0.17 y  $j_0$  igual a  $4.90 \times 10^{-7} A cm^{-2}$ . Sin embargo, se toma como base para este estudio el agua entubada, pues está dirigido a tener aplicación práctica ocupando el mínimo de elementos, equipos y reactivos.
- El empleo de la celda tipo H eleva la tasa de generación de  $H_2O_2$  en agua entubada. El peróxido de hidrógeno generado en mencionada celda tuvo un valor de  $41 mg L^{-1}$ , comparado con los  $13 mg L^{-1}$  que se alcanzó en la celda simple con una relación de 3 a 1. La razón de este incremento fue la separación de las celdas mediante la membrana permeable, misma que evita que el peróxido de hidrógeno generado en el cátodo por reducción se descomponga en el ánodo. Por lo tanto, las celdas que se ocupen en el proceso de generación electroquímica de  $H_2O_2$  deberán ser del tipo H.
- Para generar,  $H_2O_2$  en volúmenes superiores a los empleados en este estudio manteniendo las mismas condiciones de trabajo, se pueden ocupar sistemas



en serie, pues se tratan de sistemas iguales a los utilizados en este proyecto que tienen la alimentación y salida acoplados a la siguiente celda, con la ventaja adicional, que se puede elevar la concentración en un 20%.

- La membrana fabricada para separar la solución entre celdas, presentó dificultades como son una baja resistencia mecánica, pues muchas de ellas no soportaban la compresión al momento de acoplar las celdas y tampoco resistían la presión generada por la transferencia de iones entre celdas. Al mejorar mencionada característica, la resistencia eléctrica presentó valores que superaban los 2000 K $\Omega$ , lo que afecta directamente al consumo de energía eléctrica pues se eleva el potencial requerido.
- Aunque la cantidad de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> generado fue el 48.24% del valor mínimo teórico necesario para desactivar las bacterias, se ha demostrado que en presencia de radiación UV es posible combinar los procesos y generar radical  $\cdot$ OH que es letal para los microorganismos (*Ecoli* y coliformes fecales) eliminándolos en un 100% (NMP 100<sup>-1</sup> mL<sup>-1</sup> menor a 1,1). Además, evitan cualquier posibilidad de autoreparación debido a que el ataque combinado daña el mecanismo de replicación en el ADN, la parte interior de las bacterias y la membrana celular simultáneamente.
- El sistema de desinfección propuesto en este estudio, inicialmente fue concebido para actuar directamente en agua para consumo humano no tratada. Sin embargo, es necesario incluir una etapa previa de filtración, puesto que la presencia de cuerpos extraños disminuirán la cantidad de radicales  $\cdot$ OH generados. Además, mencionados elementos evitarán que la radiación ultravioleta dañe el ADN de las bacterias.
- Si bien el consumo de energía, es un 10% superior al que se ocuparía con el uso de únicamente radiación ultravioleta, con el desarrollo de este proyecto se

ha llegado a comprobar que para la desinfección de agua es posible encontrar: un método de descontaminación amigable con el ambiente, pues no se generan reacciones indeseables durante el proceso. El sistema de desinfección, puede ser desarrollado *in situ* lo que evita el transporte sustancias oxidantes. Su consumo energético es bajo, alrededor de 0.06 Kw-h para un abastecimiento de 100 L, lo que puede ser suplido con un panel solar de 300 Wp. Las partes y piezas empleadas en la generación son de fácil construcción, reposición y son económicamente alcanzables. En consecuencia, se ha probado que es posible encontrar un método de desinfección alternativo al tradicional de cloración, evitando los peligros que este conlleva. Además el método probado es versátil, pues se lo podría acoplar al antes mencionado sin efectos adversos.

- La generación electroquímica de  $H_2O_2$  se muestra prometedora, pues mejorando el diseño de la membrana y disminuyendo el consumo de energía por aireación se puede reducir el requerimiento energético global de la generación incrementando la eficiencia de producción.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Es recomendable buscar nuevos materiales y/o variar la geometría del electrodo de trabajo, para mejorar la producción de peróxido de hidrógeno. Se sugiere en una próxima investigación, buscar la forma de incrementar el área del electrodo.
- Mejorar el diseño de la membrana utilizada en este proyecto, ya que esto conllevaría a una disminución considerable de la energía requerida y un mejor control de la corriente y el voltaje.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acosta Castellanos P. M., Caro Camargo C. A. y Perico Granados N. R. (2015). Análisis de interferencia de parámetros físicos del agua, en desinfección por radiación UV. *Revista de Tecnología*, 14(2), 105-112.
- Alzate Gaviria L. M., (2008). Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM. *Interciencia*, 33(7), 503-509.
- Aquihuatl M., Volke T., Prado L., Shirai K., Ramírez F., y Salazar M. (2004). Manual de prácticas de laboratorio microbiología general *Unidad Iztapalapa, Departamento de Biotecnología* (pp. 45-48, 61-63). Iztapalapa: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Arana A. M. H. y García E. R. (2005). *Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el Municipio de San Andrés Cholula*. (Licenciatura en Ingeniería Civil), Universidad de las Américas, Cholula, Puebla, México.
- Argerich González M. J., Berna Ferrer D., Canals Morta M., Carcelero San Martín E., Codina Jané C., Domínguez Tordera P., Zaragoza Arnau M. (s.f.). *Higiene y Antisepsia del Paciente Limpieza, Desinfección y Esterilización en el Ámbito Hospitalario*. In S. C. d. F. Clínica (Ed.), (pp. 111-116). Barcelona, España: Fundación Académica
- Awasthi G., Kumar S., Sanghi A. y Singh S. S. (2013). *Biochemistry Laboratory Manual*. Indore, India: International E - Publication.
- Ayala Trujillo S. A. y Pacheco Espinel G. S. (2013). *Implementación de un sistema de control y monitoreo de cloración de agua en forma remota mediante tecnología ZIGBEE para la planta de potabilización El Calzado de la EPMAPAL*. ESPE, 1-10.
- Bard A. J., Faulkner L. R., Leddy J. y Zoski C. G. (1980). *Electrochemical methods: fundamentals and applications* (Second ed.). New York: Jhon Wiley & Sons.

- Baxter C. S., Hofmann R., Templeton M. R., Brown M. y Andrews R. C. (2007). Inactivation of Adenovirus Types 2, 5, and 41 in Drinking Water by UV Light, Free Chlorine, and Monochloramine. *Journal of Environmental Engineering*, 133(1), 95-103.
- BUN-CA. (2002). Solar Fotovoltaica. In B. U. N. (BUN-CA) (Ed.), *Manuales sobre energía renovable* (Primera ed., pp. 1-42). San Jose C.R.: BUN-CA.
- Caíres Pereira Gusmão I. C., Bueno Moraes P. y Dino Bidoia E. (2010). Studies on the Electrochemical Disinfection of Water Containing *Escherichia coli* using a Dimensionally Stable Anode *Brazilian archives of Biology and Technology*, 53(5).
- Camacho A. y Gille, M. (2009). *Método para la Determinación de Bacterias Coliformes, Coliformes Fecales y Escherichia coli por la Técnica de Diluciones en Tubo Múltiple (Número Más Probable o NMP): Técnicas para el Análisis Microbiológico de Alimentos*. México. 2ª ed. Facultad de Química, UNAM. 17p.
- Campoverde Barros J. A. (2015). *Análisis del efecto toxicológico que provoca el consumo humano de agua no potable, mediante la determinación de cloro libre residual en aguas tratadas de las parroquias rurales del Cantón Cuenca*. (Tesis de Maestría), Universidad Estatal de Cuenca, Cuenca Ecuador.
- Cantoni O., Brandi G., Salvaggio L. y Cattabeni F. (1988). Molecular mechanisms of hydrogen peroxide cytotoxicity. *Annali dell'Istituto superiore di sanita*, 25(1), 69-73.
- Castro de Esparza M. L. (1992). *Uso de cloro para la desinfección de agua para consumo: efectos en la salud humana*. Retrieved CEPIS/OPS,
- Cerón M. L. y Soto Buber A. (2004). *Elementos de Electroquímica*. (s.e)
- Chang R. (2002). *Química*. Séptima Edición. Editorial McGraw-Hill. Ciudad de México, México.
- CONAGUA. (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Coyoacán, México D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México.
- Curtis H., Barnes N., Schnek A. y Massarini A. (2008). *Biología*. (Séptima ed.). Chile: Médica Panamericana S.A.

- Damaskin B. B. y Petri O. A. (1980). *Fundamentos de la Electroquímica Teórica*. Moscú: Mir.
- Digi-Ivy, I. (2012). *User's Manual, DY2100B Mini Potentiostat*. In I. Digi-Ivy (Ed.), (pp. 1-40). Austin, USA.
- Domènech X., Jardim W. F. y Litter M. I. (2001a). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. *Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea*, Cap 1, 7-33.
- Dragasma. (2010). Transferencia de masa (Hidrodinámica). Recuperado de <https://es.slideshare.net/dragasma/transferencia-de-masa/4> (Noviembre 2016)
- Espinosa López G., y Llanes Mazón A. (2004, 08/10/2004). *Reparación del DNA*.
- Espinoza-Montero P. J., Vasquez-Medrano R., Ibanez J. G. y Frontana-Uribe B. A. (2013). Efficient anodic degradation of phenol paired to improved cathodic production of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> at BDD electrodes. *Journal of the Electrochemical Society*, 160(7), G3171-G3177.
- Esteban F. y Pelle Blanc L. (2013). *Procesos de Producción de Peróxido de Hidrógeno*. In U. T. Nacional (Ed.), (pp. 343-357). Córdoba, Argentina: Facultad Regional de Córdoba.
- Farrera Gamboa L. F. (2013). *Fuerza Electromotriz y Potencial Estándar*. In UNAM. México (UNAM Ed.), (pp. 1-22). México: Departamento de Físico Química.
- Flores E. (2013). Voltametría cíclica: la espectroscopía electroquímica. Parte I. *Revista de Química*, 9(2), 165-172.
- Galvín R. M. (1995). *Análisis de aguas y ensayos de tratamiento*. Barcelona: Gestió i Promoció.
- Galvis A., Aponte G., Echeverry D. F., González M. I. y Cardona, D. A. (2005). Evaluación del funcionamiento de un Generador de Ozono a escala piloto en la desinfección de agua para consumo humano. *Revista de Ingeniería y Competitividad*, 7(1), 65-72.
- García Calvo E. y Letón P. (2012). *Guía de Tecnologías de Tratamiento de aguas para su reutilización*. España: CONSOLIDER TRAGUA.
- García Herrera J. C. (2014). *Procesos fenton y foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales de laboratorio microbiológico empleando Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> soportado en*

- nanotubos de carbono*. (Tesis de Pregrado), Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Hammeken Arana A. M. y García E. R. (2005). *Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Cholula*. (Tesis de Pregrado), Universidad de las Américas Puebla, Puebla, México.
- Healthdefine. (2016). *E.coli: 7 tips so you'll never get sick*. Recuperado de <http://healthdefine.com/medical-advice/e-coli-7-tips-so-youll-never-get-sick> (Noviembre 2016)
- Herrera Rodríguez R. (2012). Manejo de líquidos en el paciente geriátrico. *Revista Mexicana de Anestesiología*, 35(1), S184-S188.
- Huete C. P. (2008). *Energía Renovable: Estudio de Sistemas Fotovoltaico y Eólico de Pequeña Escala*. (Tesis de pregrado), Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Imlay J. A. y Linn S. (1986). Bimodal pattern of killing of DNA-repair-defective or anoxically grown *Escherichia coli* by hydrogen peroxide. *Journal of bacteriology*, 166(2), 519-527.
- INEN. (2011). NTE INEN 1108: *Agua Potable* (pp. 1-11). Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN].
- Jaramillo Cazco C. N. (2010). *Desinfección del agua para uso humano*. (Tesis de Pregrado), Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Labas M. D., Zalazar C. S., Brandi R. J. y Cassano A. E. (2008). Reaction kinetics of bacteria disinfection employing hydrogen peroxide. *Biochemical Engineering Journal*, 38(1), 78-87.
- Leboffe M. J. y Pierce B. E. (2012). *Microbiology: Laboratory Theory and Application*. (Second ed.). San Diego, USA: Morton Publishing Company.
- Linares-Hernández I., Martínez-Miranda V., Díaz C. B., Pavón-Romero S., Bernal-Martínez L. y Lugo V. L. (2011). Oxidación de materia orgánica persistente en aguas residuales industriales mediante tratamientos electroquímicos. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 2(1), 21-36.
- Linley E., Denyer S. P., McDonnell G., Simons C. y Maillard J. Y. (2012). Use of hydrogen peroxide as a biocide: new consideration of its mechanisms of biocidal action. *J Antimicrob Chemother*, 67(7), 1589-1596.

- López Á. M. (2016). *Estudio de la influencia de la pre-ozonización, como parte del tratamiento de aguas destinadas al consumo humano, en la formación de compuestos organohalogenados*. (Título de pregrado), Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Ma Q., Liu T., Tang T., Yin H. y Ai S. (2011). Drinking water disinfection by hemin-modified graphite felt and electrogenerated reactive oxygen species. *Electrochimica Acta*, 56(24), 8278-8284.
- Madigan M., Martinko J. y Parker J. (2003). *Biología de los microorganismos* (Décima ed.). México D. F.: Pearson, Prentice Hall.
- Maldonado M. I., Oller I., Gernjak W., Malato S., Hincapié M., Sánchez N. E., Toro Botero F. M., (2008). *Tendencias de la investigación en Ingeniería Ambiental* (Primera ed.). Medellín, Colombia: Universidad de Medellín.
- Marcó J. (2016). *Química del agua. Bromato.*, Recuperado de <http://www.quimicadelagua.com/> (Septiembre 2016)
- Mariana. (2016). Membrana celular: Estructura. Recuperado de <http://bioprimercuatrimestre.blogspot.com/2015/05/membrana-celular-estructura.html> (Noviembre 2016)
- Martínez Navarro F., (2007). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional*. (Tesis de Doctorado), Universidad de Castilla, La Mancha, España.
- Massol A., (2002). *Enumeración bacteriana: el número más probable* (pp. 1-5). Mayagüez, Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico.
- Muñoz Peña M. J., (2016). *Eliminación de contaminantes parabenos en agua mediante procesos físicos, químicos y electroquímicos*. (Tesis Doctoral), Universidad de Extremadura, Extremadura, España.
- Murray P., Rosenthal K. S. y Pfaller M. A., (2015). *Microbiología médica*. (Sexta ed.). Brasil: Elsevier Brasil.
- OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable*. (OMS Ed. Tercera ed. Vol. 1). Génova, Suiza.



- Osorio F., Torres J. y Sánchez M. (2010). *Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes (aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales)*. Madrid, España: Diaz de Santos.
- Panizza M. y Cerisola G., (2008). Electrochemical generation of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in low ionic strength media on gas diffusion cathode fed with air. *Electrochimica Acta*, 54(2), 876-878.
- Peralta Reyes E. y Natividad Rangel R. (2013). *Electrosíntesis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en una Columna de Burbujeo de Flujo paralelo descendente*. (Tesis Doctoral), Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México
- PINE. (2016). *Rotating Electrode Theory*. Recuperado de <https://www.pineresearch.com/shop/knowledgebase/rotating-electrode-theory> (Septiembre 2016)
- Polcaro A. M., Vacca A., Mascia M., Palmas S., Pompei R. y Laconi S., (2007). Characterization of a stirred tank electrochemical cell for water disinfection processes. *Electrochimica Acta*, 52(7), 2595-2602.
- Qiang Z., Chang J.-H. y Huang C. P., (2002). Electrochemical generation of hydrogen peroxide from dissolved oxygen in acidic solutions. *Water Research*, 36(1), 85-94.
- Ramírez S. A., Contreras F. G. y Gómez E. M. (2005). La fase estacionaria en la bacteria *Escherichia coli*. *Latinoamericana Microbiología*, 47, 92-101.
- Ramón Avalos S. O., Rosas Acevedo J. L. y Vargas Román W. E., (2016). Eficiencia desinfectante del peróxido de hidrógeno al 3 y 4% en el lavado de lechuga romana (*Lactuca sativa* L). *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1-5.
- Rieger P. H., (1987). *Electrochemistry*. Lincolnshire, UK: Prentice Hall.
- Robredo G.A.R., (2001). *Electrónica básica para ingenieros* (Primera ed.). Santander, España: Universidad de Cantabria.
- Santiago Dionisio M. C., (2008). *Manual de prácticas de laboratorio de microbiología I y II: diversidad y estructura de los microorganismos*. México, D.F.: Universidad Autónoma de Guerrero.



- Sawyer D. T., Sobkowiak A. y Roberts J. L., (1995), *Electrochemistry for chemists*. (Second ed.). New York, USA: Wiley.
- SIGMA. (1996). *AGAROSE*. In SIGMA (Ed.), (pp. 1-8). Saint Luis, Missouri: SIGMA.
- Silva, M. (2013). *Plantas de Potabilización, Desinfección*. FICA. Escuela Politécnica Nacional (Ed.), (pp. 1-16). Quito, Ecuador.
- Solsona F. y Méndez J. P., (2002), *Radiación Ultravioleta*. OPS Agency (Ed.), Organizacion Panamericana de la Salud (pp. 77-91). Lima, Perú.
- Sommer R., Haider T., Cabaj A., Pribil W. y Lhotsky M. (1998). Time dose reciprocity in UV disinfection of water. *Water science and technology*, 38(12), 145-150.
- Suárez J. y Jácome A. (2009). *Desinfección UV*. Universida de la Coruña (Ed.). Coruña, España: Campus de Elviña.
- Tarrán E. P. (2002). Desinfección por luz ultravioleta. *Revista Água Latinoamérica*, 2, 28-35.
- Town J. L., MacLaren F. y Dewald, H. D. (1991). Rotating disk voltammetry experiment. *J. Chem. Educ*, 68(4), 352.
- Vermeulen N., Keeler W. J., Nandakumar K. y Leung K. T. (2008). The bactericidal effect of ultraviolet and visible light on *Escherichia coli*. *Biotechnology and bioengineering*, 99(3), 550-556.
- Villanueva C. M., Manolis K. y Grimalt J. O. (2001). Cloración del agua potable y efectos sobre la salud: revisión de estudios epidemiológicos. *Medicina clínica*, 117(1), 27-35.
- Walsh F. (1999). *Un primer curso de ingeniería electroquímica*. (Primera ed.). Alicante, España: Club Universitario.
- Woomer P. L. (1994). *Most probable number counts*. *Methods of Soil Analysis: Part 2—Microbiological and Biochemical Properties* (methodsofsoilan2), 59-79.
- Wright H. B. y Cairns, W. L. (1990). Desinfección de agua por medio de luz ultravioleta. *Trojan Technologies Inc*. Ontario, Canadá.

## **ANEXOS**

**ANEXO No 1**

**AGENTES PATÓGENOS COMÚNMENTE ENCONTRADOS  
EN AGUA DE CONSUMO HUMANO ANTES DE SER  
TRATADA**

### Agente patógeno

#### Bacterias

*Burkholderia pseudomallei*  
*Campylobacter jejuni*, *C. coli*  
*Escherichia coli* patògena d  
*E. coli* enterohemorràgica  
*Legionella* spp.  
*Micobacterias* no tuberculosas  
*Pseudomonas aeruginosa* e  
*Salmonella typhi*  
 otras salmonelas  
*Shigella* spp.  
*Vibrio cholerae*  
*Yersinia enterocolitica*

#### Virus

*Adenovirus*  
*Enterovirus*  
*Virus de la hepatitis A*  
*Virus de la hepatitis E*  
*Norovirus* y *sapovirus*  
*Rotavirus*

#### Protozoos

*Acanthamoeba* spp.  
*Cryptosporidium parvum*  
*Cyclospora cayetanensis*  
*Entamoeba histolytica*  
*Giardia intestinalis*  
*Naegleria fowleri*  
*Toxoplasma gandii*

#### Helmintos

*Dracunculus medinensis*  
*Schistosoma* spp.

#### Protozoos

*Acanthamoeba* spp.  
*Cryptosporidium parvum*  
*Cyclospora cayetanensis*  
*Entamoeba histolytica*  
*Giardia intestinalis*  
*Naegleria fowleri*  
*Toxoplasma gandii*

#### Helmintos

*Dracunculus medinensis*  
*Schistosoma* spp.

Fuente: Campoverde Barros (2015), Análisis del efecto toxicológico que provoca el consumo humano de agua no potable, mediante la determinación de cloro libre residual en aguas tratadas de las parroquias rurales del Cantón Cuenca.

**ANEXO No 2**

**AGENTES PATÓGENOS QUE PUEDEN SER ELIMINADOS  
POR IRRADIACIÓN ULTRAVIOLETA**

## Microorganismos

### Bacterias

*Bacillus anthracis*  
*Bacillus subtilis, esporas*  
*Bacillus subtilis*  
*Campylobacter jejuni*  
*Clostridium tetani*  
*Corynebacterium diphtheriae*  
*Escherichia coli*  
*Klebsiella terrigena*  
*Legionella pneumophila*  
*Sarcina lutea*  
*Mycobacterium tuberculosis*  
*Pseudomonas aeryginosa*  
*Salmonella enteritidis*  
*Salmonella paratyphi*  
*Salmonella typhi*  
*Salmonella typhimurium*  
*Shigella dysenteriae*  
*Shigella flexneri (paradysenteriae)*  
*Shigella sonnei*  
*Staphylococcus aureus*  
*Streptococcus pyogenes*  
*Vibrio cholerae (V.comma)*  
*Yersinia enterocolitica*  
*B. Megatherium sp.(sporas)*  
*B. Megatherium sp.(veg)*  
*B. peratyphosus*  
*Eberthella typosa*  
*Micrococcus candidus*  
*Neisseria catanhalis*  
*Phytomonas tumefaciens*  
*Proteus vulgaris*  
*Pseudomonas fluorescens*  
*Salmonella*  
*Serratia marcescens*  
*Dysentery bacilli*  
*Spirillum rubrum*  
*Staphylococcus alous*  
*Streptococcus hemolyticus*  
*Streptococcus viridans*  
*Streptococcus lactis*

### Virus

*MS-2 Coliphage*  
*F-especifica bacteriophage*  
*Hepatitis A*  
*Influenza virus*  
*Poio virus (poliomyelitis)*  
*Rotavirus*  
*Bacteriophage (E.coli)*

### Protozoarios

*Giardia lamblia*  
*Cryptosporidium parvum*

### Algas

*Azul-verde*  
*Chlorella vulgaris*

### Levaduras

*Saccharomyces cerevisiae*  
*Saccharomyces sp.*  
*Saccharomyces ellipsoideus*  
*Levadura para cerveza*  
*Levadura parapanaderia*  
*Levadura para reposteria*

### Esporas

*Penicillium roqueforti*  
*Penicillium expansum*  
*Mucor racemosus A*  
*Mucor racemosus B*  
*Oospora lactis*

Fuente: Tarrán (2002), Desinfección por luz ultravioleta. Solsona and Méndez (2002), Radiación ultravioleta.

**ANEXO No 3**

**TABLA CON LOS VALORES DEL NÚMERO MÁS  
PROBABLE. PARA DETERMINAR EL NÚMERO DE  
BACTERIAS**

<b>Núm. Respuestas</b>	<b>Población estimada</b>	<b>Núm. Respuestas</b>	<b>Población estimada</b>
<b>Pos.por nivel de Dilución</b>		<b>Pos.por nivel de Dilución</b>	
1-2-3-4-5-6		1-2-3-4-5-6	
1-0-0-0-0-0	1.9	5-5-4-2-0-0	2159
1-1-0-0-0-0	4	5-5-4-3-0-0	2716
2-0-0-0-0-0	4.4	5-5-5-0-0-0	2305
2-1-0-0-0-0	6.8	5-5-5-0-1-0	3126
3-0-0-0-0-0	7.7	5-5-5-1-0-0	3282
3-1-0-0-0-0	10	5-5-5-1-1-0	4532
3-2-0-0-0-0	13	5-5-5-2-0-0	4922
4-0-0-0-0-0	12	5-5-5-2-1-0	6918
4-1-0-0-0-0	16	5-5-5-3-0-0	7797
4-2-0-0-0-0	21	5-5-5-3-1-0	10702
4-3-0-0-0-0	27	5-5-5-3-2-0	13826
5-0-0-0-0-0	23	5-5-5-4-0-0	12753
5-0-1-0-0-0	31	5-5-5-4-1-0	16902
5-1-0-0-0-0	33	5-5-5-4-2-0	21589
5-1-1-0-0-0	45	5-5-5-4-3-0	27150
5-2-0-0-0-0	49	5-5-5-5-0-0	23054
5-2-1-0-0-0	69	5-5-5-5-0-1	31225
5-3-0-0-0-0	78	5-5-5-5-1-0	32720
5-3-1-0-0-0	107	5-5-5-5-1-1	45261
5-3-2-0-0-0	138	5-5-5-5-2-0	49224
5-4-0-0-0-0	127	5-5-5-5-2-1	69148
5-4-1-0-0-0	169	5-5-5-5-3-0	78127
5-4-2-0-0-0	216	5-5-5-5-3-1	107022
5-4-3-0-0-0	270	5-5-5-5-3-2	138269
5-5-0-0-0-0	230	5-5-5-5-4-0	127528
5-5-0-1-0-0	312	5-5-5-5-4-1	169028
5-5-1-0-0-0	327	5-5-5-5-4-2	215899
5-5-1-1-0-0	453	5-5-5-5-4-3	271557
5-5-2-0-0-0	488	5-5-5-5-4-4	334051
5-5-2-1-0-0	692	5-5-5-5-5-0	230546
5-5-3-0-0-0	780	5-5-5-5-5-1	328192
5-5-3-1-0-0	1070	5-5-5-5-5-2	492238
5-5-3-2-0-0	1383	5-5-5-5-5-3	781272
5-5-4-0-0-0	1275	5-5-5-5-5-4	1312535
5-5-4-1-0-0	1690		

\*Esta es la densidad poblacional estimada asumiendo 1ml de inóculo. Este valor será ajustado por el factor de dilución y el volumen de inóculo (por ejemplo, si se inoculó en cada placa un volumen de 10 uL, entonces el valor de la tabla debe ser corregido multiplicandolo por 100 ( $10 \times 100 = 1,000 \text{ul}$  ò 1ml).

Fuente: Woormer (1994), Most probable number counts.



**ANEXO No 4****CUADRO CON EXPERIENCIAS DE GENERACIÓN DE  
PERÓXIDO DE HIDRÓGENO**

Electrodos	Medio de generación	Parámetros de generación	Tipo de celda	Peroxido generado y eficiencia	Suministro de aire u oxígeno	Investigadores
Electrodo de difusión de gas como cátodo Cátodo: 1 Electrodo de grafito 2 Electrodo de difusión de gas y ánodo de platino	Medio ácido	Corriente de 1 a 10 A dm <sup>-2</sup> E = -0.9 V vs. ECS	Celda compuesta	Eficiencia del 11% a 1%		Saha <i>et al.</i> , 2003
Grafito como cátodo y electrodo de platino como contraelectrodo	Medio ácido	-0.9 V, 6 mA cm <sup>-2</sup>	Celda compuesta		Suministro de oxígeno	Da Pozzo <i>et al.</i> , 2005a
Electrodo cilíndrico de carbón vítreo reticulado (CVR) rotatorio como cátodo	Solución acuosa de hipofosfito	E = -1.6 V vs. ECS. Corriente 0.18 A y 2.5 V. Temperatura 10 °C	Celda termostata	275 mg L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> . Tiempo 4 horas. Eficiencia 7.8%.	Suministro de oxígeno	Da Pozzo <i>et al.</i> , 2005b
Carbón vítreo reticulado como cátodo	0.3 M K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	E = -1.6 V vs. Pt. Temperatura 10 °C	Reactor en semi-batch		Suministro de oxígeno	Badellino <i>et al.</i> , 2006
Carbón vítreo reticulado como el electrodo de trabajo y una malla de níquel como contraelectrodo	Ausencia y presencia de ultrasonido	E = -0.6 a -1.2 V vs. SCE. Temperatura 21 °C	Reactor semi-batch	E = 0.6 V vs. ECS. Eficiencia del 30% - 60%	Suministro de oxígeno	Badellino <i>et al.</i> , 2007
Diamante dopado con boro como cátodo	0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	j = 150 mA cm <sup>2</sup> durante 9 h, 25 °C	Celda dividida	54 mM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Suministro de oxígeno	González-García <i>et al.</i> , 2007
Electrodos de esponja de carbón y felpa de carbón como cátodo, contraelectrodo de platino	0.1 M NaNO <sub>3</sub>	j = 100 mA (5.6 mA cm <sup>-2</sup> ).	Reactor de flujo	8.05 mM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> para esponja de carbón y	Suministro de oxígeno	Brillas <i>et al.</i> , 2008
			Celda única			Özcan <i>et al.</i> , 2008

	Temperatura 15 °C				2.7 mM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> para felpa de carbón		
Cátodo tridimensional de grafito y como ánodo un electrodo de Pt/Ti	j = 68 A cm <sup>-2</sup> . Temperatura 25 °C		Celda dividida		Suministro de oxígeno		Wang <i>et al.</i> , 2008
Electrodos de difusión de gas	j = 30 mA cm <sup>-2</sup> . pH = 7 Temperatura 15 °C	Solución de baja fuerza iónica	Celda dividida		Suministro de aire	Eficiencia del 53%	Panizza y Cerisola, 2008
Tela de carbón como cátodo	j = -300 mA cm <sup>-2</sup>	0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Reactor batch		Suministro de oxígeno	5.6 mM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 50 ppm H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Tiempo 100 min	Peralta-Hernández <i>et al.</i> , 2008
Fibra de carbón activado como cátodo					Suministro de aire	170.94 μM de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Xu <i>et al.</i> , 2008
Electrodo de grafito modificado con polipirrol (PPy)/antraquinonadisulfonato (AQDS) como cátodo y electrodo de platino como ánodo	E = -0.65 V vs. ECS Temperatura 23-25 °C pH 3	0.1 M de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Celda única		Suministro de oxígeno	20 mg L <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Eficiencia de corriente entre 64 % -73%	Zhang <i>et al.</i> , 2008
Cátodo: 1 Nanotubos de carbono funcionalizados con nitrógeno (NCNT) 2 Electrodo de difusión de gas de latex de politetrafluoroetileno (PTFE). Contraelectrodo de platino	V = - 0.85 V Tiempo 90 min Temperatura 25 °C		Celda única		Suministro de oxígeno	Con NCNT, 145.62 mg L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (NCT) 103.97 mg L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Grafito 92.59 mg L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Zhang <i>et al.</i> , 2008
Cátodo: 1 Grafito (o carbón negro) 2 Polytetrafluoroetileno (PTFE) Contraelectrodo de platino	E = - 0.55 V vs. ECS pH 3	0.1 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Celda única		Suministro de oxígeno	9.9 mg L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Tiempo de 140 min Eficiencia 61-78%.	Zhou <i>et al.</i> , 2008

Fibra de carbón felt activado (CFA) como cátodo y como ánodo una malla de RuO <sub>2</sub> /Ti	0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	i = -0.36 A pH 3	Reactor electroquímico sin división	600 µM, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Suministro de oxígeno	Wang et al., 2008
Placa de platino como cátodo y ánodo		V = 6 V Temperatura 303 °K Tiempo 3 h pH 2	Celda única	Con alimentación de O <sub>2</sub> 440 mg L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y sin alimentación de O <sub>2</sub> 400 mg L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Con y sin suministro de oxígeno	Chen y Li 2009
Electrodo tridimensional de carbón vítreo reticulado (CVR) como cátodo y acero inoxidable comercial 304 como ánodo	0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	V = 1.5 V, 1.7 V I ≈ 70 mA	Celda compuesta doble	1 mM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Eficiencia ≈ 70±5% Tiempo 200 min		Figuroa et al., 2009
Electrodo de difusión de gas como cátodo y una malla de Pt como ánodo	0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	i = 200 mA pH 3, Temperatura 35 °C			Suministro de oxígeno	Panizza y Cerisola 2009
Cátodo: 1 Carbón Vulcan XC-72 2 Carbón negro de acetileno 3 Mezcla de carbón Vulcan XC-72 y carbón negro de acetileno. Contraelectrodo de platino	0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> y 0.04 M NaHSO <sub>4</sub>	E = -0.6 a -0.9 V vs. ECS pH 2	Celda doble	Mejor resultado Vulcan XC-72 y el carbón Vulcan XC-72 y carbón negro de acetileno	Suministro de oxígeno	Petrucci et al., 2009
Electrodo de difusión de gas de felpa de carbón como cátodo y ánodo un electrodo de Ti/RuO <sub>2</sub> /IrO <sub>2</sub>		pH 2	Celda de dos compartimentos	0.23 M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Tiempo 2 h	Suministro de aire	Raghu et al., 2009
Carbón vítreo reticulado (CVR) como cátodo y como ánodo: 1) Platino en celda dividida 2) Acero inoxidable en celda sin división	0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	E = -0.7 vs. ECS pH 2 Temperatura ambiente	1) Celda dividida 2) Celda sin división	1) 5 x 10 <sup>-5</sup> M min <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 2) 8.5 x 10 <sup>-5</sup> M min <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		Silva y Lizama, 2009

Electrodo de diamante dopado con boro (DDB) como cátodo y platino como ánodo	0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	j = 23 mA cm <sup>-2</sup> pH 3	Celda única	88 mg L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Suministro de oxígeno	Cruz-González <i>et al.</i> , 2010
Electrodo de feipa de carbón como cátodo Ánodo: 1) Electrodo de platino s de Pt 2) Electrodo Diamante dopado con boro (DDB)	0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	i = 30-450 mA pH de 3 Temperatura de 23,2 °C	Celda única		Suministro de aire	Dirany, <i>et al.</i> , 2010
Electrodo de gas fabricado de carbón-politetrafluoroetileno Ánodo: 1) Contraelectrodo de platino 2) Contraelectrodo de diamante dopado con boro (DDB)		j = 50 y 150 mA cm <sup>-2</sup> pH 3 temperatura 35 °C	Reactor de tanque sin división de flujo batch	18 mM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y 50 mM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Tiempo 360 min	Suministro de oxígeno en el ánodo y suministro de aire en el cátodo	Guinea <i>et al.</i> , 2010
Catodo: 1) Electrodo de Fibra de carbón activado 2) Grafito Como ánodo malla de RuO <sub>2</sub> /Ti	0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	j = 8.89 mA cm <sup>-2</sup> pH 3 Temperatura 27 °C		1) 556.11 μM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 2) 76.61 μM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Tiempo 240 min	Suministro de aire	Lei <i>et al.</i> , 2010
Carbón vítreo reticulado como cátodo Placa de Ti cubierta con platino como ánodo		V = 2.3 V pH 6	Reactor electroquímico dos celdas	0.0087 mM min <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		Seung-Hee <i>et al.</i> , 2010
Cátodo fabricado con 4% en peso de Co sobre carbón Contraelectrodo de platino		295 °K.	Celda doble		Suministro de oxígeno	Bonakdarpour <i>et al.</i> , 2011
Electrodo de diamante dopado con boro (DDB) como cátodo y ánodo	0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH 3	Celda única		Suministro de aire	Cruz-González, <i>et al.</i> , 2011
Electrodo de difusión de gas (EDG) como cátodo Malla de Ti como ánodo		j = 40 mA cm <sup>-2</sup> pH 5 Temperatura de 25 °C		17 mg L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Tiempo 200 min	Suministro de aire	Gu <i>et al.</i> , 2011

<p>Cátodo:</p> <p>1) Barra de grafito</p> <p>2) Carbón activado inmovilizado sobre una superficie de grafito (CA/grafito)</p> <p>3) Nanotubos de carbón inmovilizados sobre superficie de grafito (NTsC/grafito)</p> <p>Ánodo de platino</p>	0.05 M de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	i = 100 mA (j = 2.5 mA cm <sup>-2</sup> ) pH 3 Temperatura 25 °C		3) NTsC/grafito 120 mM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Suministro de aire	Khataee, et al., 2011
Electrodo de felpa de carbón como cátodo y contraelectrodo de platino o diamante dopado con boro	0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH de 3	Celda única		Suministro de aire	Oturán, et al., 2011
Electrodo de felpa de grafito como cátodo	0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	i = 300 mA pH 3	Celda única		Suministro de aire	Panizza y Oturan 2011
Electrodo de difusión Ánodo electrodo de diamante dopado con boro	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.035 M	i = 300 mA y 480 Min pH 3 Temperatura de 10 °C	Celda única	120 mM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Suministro de aire	Randazzo et al., 2011
Electrodo con acetileno negro-PTFE como cátodo y contraelectrodo de platino	0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	j = 20 mA cm <sup>-2</sup> pH 3 Temperatura ambiente	Celda única	550 mg L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Tiempo 150 min Velocidad promedio de generación de 58.9 mg L <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> Eficiencia de corriente promedio de 92.7% Tiempo 150 min	Suministro de aire	Sheng et al., 2011
Electrodo preparado de un pigmento de grafito conductor y poli-	1 mol L <sup>-1</sup> de HCl	E = -1.2 vs. CES pH 1		23 mg L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Suministro de aire	Wang et al., 2011

tetrafluoroetileno (grafito/PTFE) modificado con 5% en peso de 2-etilantiquinona (EAQ), este es un electrodo de difusión de gas modificado (EDGM) Contraelectrodo de grafito	0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	i = 0.5 A pH 3 Temperatura ambiente	Celda única	765 µM de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> a un tiempo de 120 min	Suministro de oxígeno	Wang <i>et al.</i> , 2011
Electrodo de fibra de carbón activado (FCA) como cátodo y como ánodo malla de RuO <sub>2</sub> /Ti  cátodo de compuesto antraquinonamonosulfonato/polipirrol (AQS/PPy) sobre placa de grafito y contraelectrodo platino	0.1 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	V = -0.4 V pH de 4.3	Celda única	100 mg L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Eficiencia de corriente del 70%, Tiempo 3 h	Suministro de oxígeno	Zhang <i>et al.</i> , 2011
Electrodo de difusión de gas (EDG) fabricado con 4% CeO <sub>2</sub> /C como cátodo	1 mol L <sup>-1</sup> NaOH	V = -2.3 V Temperatura 20 °C	Celda única	871 mg L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Suministro de oxígeno	Assumpção <i>et al.</i> , 2012
Electrodo de difusión de gas (EDG) como cátodo Electrodo de Ti/SnO <sub>2</sub> -Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -IrO <sub>2</sub> como ánodo	0.1 mol L <sup>-1</sup> Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	V = -0.8 V pH 3 Temperatura de 25 °C	Reactor tanque sin división	263 mg L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Eficiencia de corriente de 46.8% Tiempo 240 min	Suministro de aire	Chu <i>et al.</i> , 2012
Cátodo: 1) Barra de grafito, carbón activado inmovilizado sobre superficie de grafito (AC/grafito) 2) Nanotubos de carbón inmovilizado sobre superficie de grafito (NTC/grafito) Contraelectrodo de platino	0.05 Mol L <sup>-1</sup> Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	i = 100 mA pH 3 Temperatura ambiente		NTC/grafito produce la mayor cantidad de 120 µM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Tiempo 240 min	Suministro de aire	Khataee <i>et al.</i> , 2012
Electrodo de difusión de gas (EDG) como cátodo y electrodo	0.1 mol L <sup>-1</sup> de K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> en	pH 1 V = -1 a -2 V 1) flujo laminar		1) V = -2.25 V 414 mg L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		Reis <i>et al.</i> , 2012

dimensionalmente estable tipo $\text{Cl}_2$ (ADS- $\text{Cl}_2$ ) como ánodo	0.1 mol $\text{L}^{-1}$ de $\text{H}_2\text{SO}_4$	2) flujo turbulento	Celda tipo H	Tiempo 120 min 2) $V = -1.75 \text{ V}$ 294 $\text{mg L}^{-1}$ $\text{H}_2\text{O}_2$		
Electrodo fabricado con el ester riboflavinilantiquinona 2- carboxilato (RF-AQ) soportado en carbón vulcan XC72 Contraelectrodo de platino	0.5 M de $\text{H}_2\text{SO}_4$	Temperatura de 21 °C		432 ppm $\text{H}_2\text{O}_2$ Eficiencia de corriente de 70 ± 5% Tiempo 24 h	Suministro de oxígeno	Wang et al., 2012
Electrodo de felpa de grafito como cátodo y ánodo de platino	1) 0.1 M $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 2) 0.1 M $\text{NaCl}$	pH 3 Temperatura ambiente	Celda sin división en modo batch	1) 157 $\text{mg L}^{-1}$ $\text{H}_2\text{O}_2$ para $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 2) 123 $\text{mg L}^{-1}$ $\text{H}_2\text{O}_2$ para $\text{NaCl}$ Tiempo en 3 h	Suministro de oxígeno	Zhou et al., 2012
Nanotubo de carbón poroso como cátodo y electrodo de $\text{Ti/SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5\text{-IrO}_2$ como ánodo	0.1 mol $\text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{SO}_4$	$V = -1 \text{ V}$ pH 3 Temperatura 25 ± 1 °C		170 $\text{mg L}^{-1}$ $\text{H}_2\text{O}_2$ Tiempo 150 min	Suministro de aire	Chu et al., 2013
Catodo: 1) Electrodo CF-1371 (fibra de carbón con área superficial específica de 1371 $\text{m}^2 \text{gr}^{-1}$ y 1 mm de espesor) 2) Electrodo CF-1410 (fibra de carbón con área superficial específica de 1410 $\text{m}^2 \text{gr}^{-1}$ y 2 mm de espesor) 3) Electrodo CCB-470 hecho de polvo de carbón el cual lo compactaron en forma de disco (4.2 cm de diámetro, 3.7 mm de espesor)	0.05 M $\text{Na}_2\text{SO}_4$	$V = 1.3 \text{ v}$ pH 3 Temperatura 25 °C Concentración inicial de oxígeno disuelto de 8.5 $\text{mg L}^{-1}$		2) CF-1410 10 $\text{mg L}^{-1}$ $\text{H}_2\text{O}_2$		Plakas et al., 2013



Electrodo de grafito felt con hidracina hidratada como material para cátodo, probaron diferentes concentraciones en la mezcla, 5, 10, 15 y 20% y los electrodos modificados los marcaron como CF-HA-5%, CF-HA-10%, CF-HA-15% y CF-HA-20% respectivamente Contraelectrodo de platino	0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	V = -0.75 V Temperatura ambiente	Celda única		Suministro de oxígeno durante 20 min	Zhou <i>et al.</i> , 2013
Cátodo y ánodo electrodos de diamante dopado con boro (DDB)	0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	j = 31 mA cm <sup>2</sup> pH 3 Temperatura ambiente	Reactor de flujo continuo	82 mg L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Tiempo 180 min.		Isarain-Chávez <i>et al.</i> , 2013

FUENTE: Peralta Reyes y Natividad Rangel, (2013), Electrosíntesis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en una Columna de Burbujeo de Flujo Paralelo Descendente.

**ANEXO No 5****CUADRO CON MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS PARA LA  
INHIBICIÓN DE PATÓGENOS**

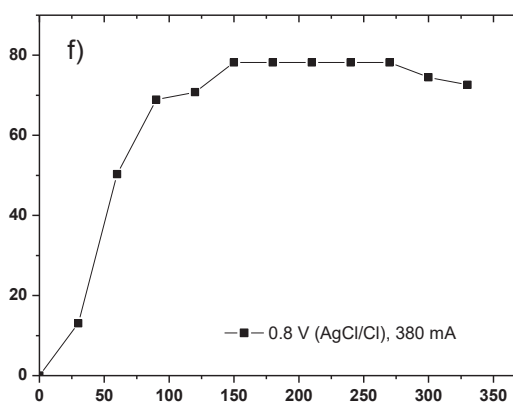
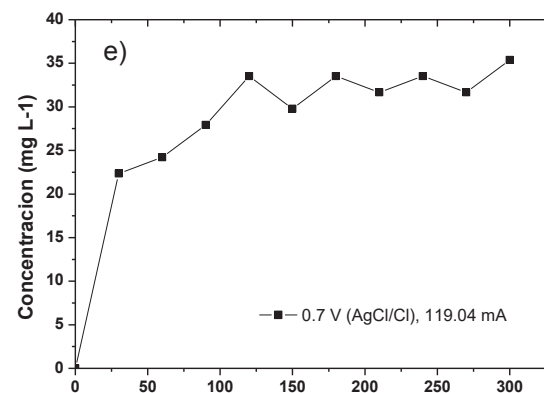
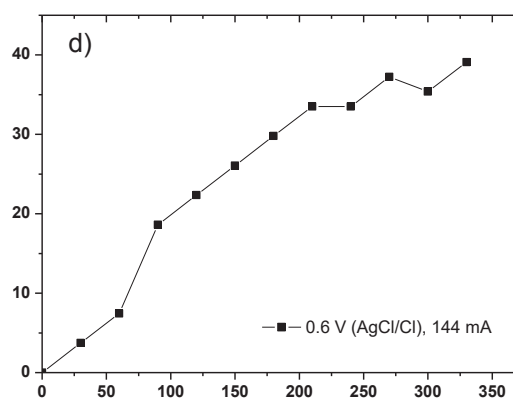
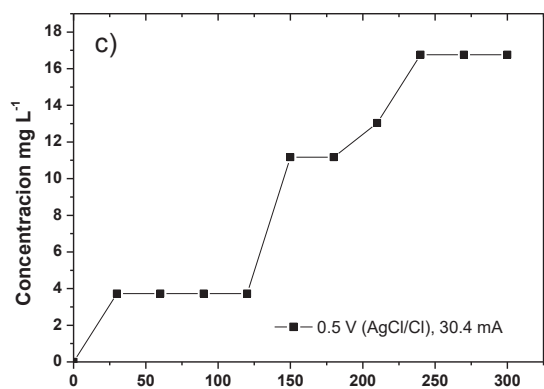
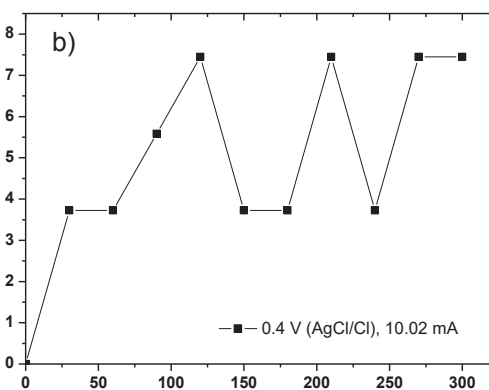
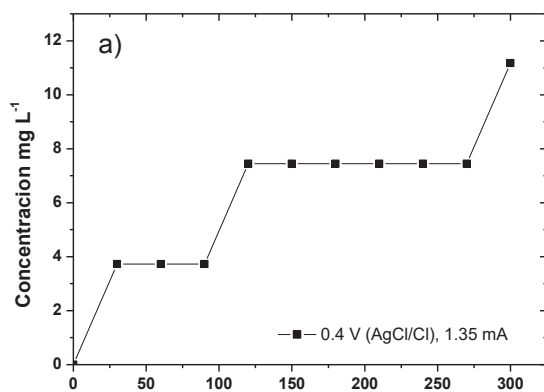
## INVESTIGACIONES DE MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS PARA LA INHIBICIÓN DE PATÓGENOS

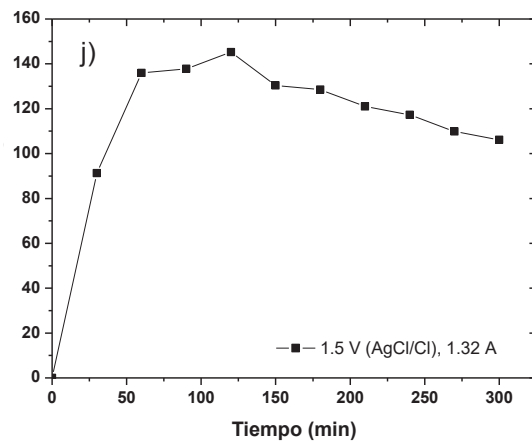
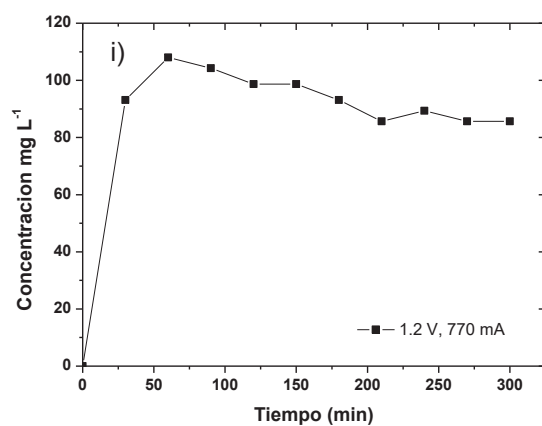
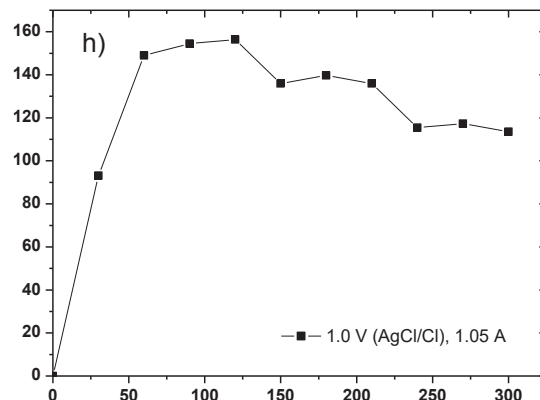
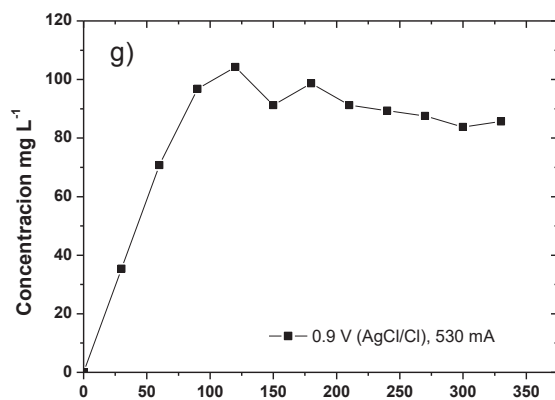
Electrodo	Suspensión	Potencial	Microorganismo	Porcentaje de esterilización (%)
Cilindro de fibra de carbono	Agua de la llave con suspensión de $2.3 \times 10^3$ cells mL <sup>-1</sup>	Flujo a través del electrodo. Potencial; 1,0 V vs. SCE durante 20 minutos y voltajes cíclicos de 0.2 a -0.8 V por 10 minutos	<i>Ecoli</i>	99.10
Malla de TiN	Agua de la llave con suspensión 73 cells mL <sup>-1</sup>	Flujo a través de la celda; 1.2 V vs. Ag/AgCl por 60 min y -0.6 V por 30 min	<i>Ecoli, Klebsiella pneumoniae, etc.</i>	93.10
Paño de carbón Laminado	Agua de la llave 10 <sup>2</sup> cells mL <sup>-1</sup>	Flujo a través de la celda; 0.7 V vs. SCE por más de 10 min.	<i>Ecoli</i>	99
Fibra de carbón	22 cells mL <sup>-1</sup>	Flujo a través de la celda 0.8 V vs. SCE.	<i>Ecoli</i>	99.70
Malla Pt-Nb	0.030 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> o 0.036 M NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ;	Celda Zappi 4–27 mA cm <sup>-2</sup> (cell voltage of 5 V) por 120 min	<i>Ecoli, bacteriófago MS2</i>	Alrededor de 99
Lamina de Platino	0.1 M PBS (pH 7.1) con una suspensión de $2 \times 10^6$ CFU mL <sup>-1</sup>	Tanque agitado 1 A	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Alrededor de 96.80
Placa de Si/DDB	1 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> con una suspensión de $6.4 \times 10^2$ CFU mL <sup>-1</sup>	Reactor 2.8–3.1 V vs. SCE por alrededor de 1 min	<i>Ecoli</i>	99.8
Lámina Ti/PbO <sub>2</sub>	50 mL 0.1 M pH 7.1 PBS con una suspensión de $1 \times 10^7$ CFU mL <sup>-1</sup>	Reactor 10 mA cm <sup>-2</sup> por 60 min	<i>Ecoli</i>	99.99
Banda de grafito /hemina	20 mL 0.2 M pH 7.0 PBS con suspensión de $1 \times 10^7$ CFU mL <sup>-1</sup>	Reactor -0.6 V vs. SCE por 60 min	<i>Ecoli</i>	99.90

FUENTE: Ma *et al.*, (2011). Drinking water disinfection by hemin-modified graphite felt and electrogenerated reactive oxygen species.

## **ANEXO No 6**

### **GENERACIÓN DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> EN CELDA SIMPLE**

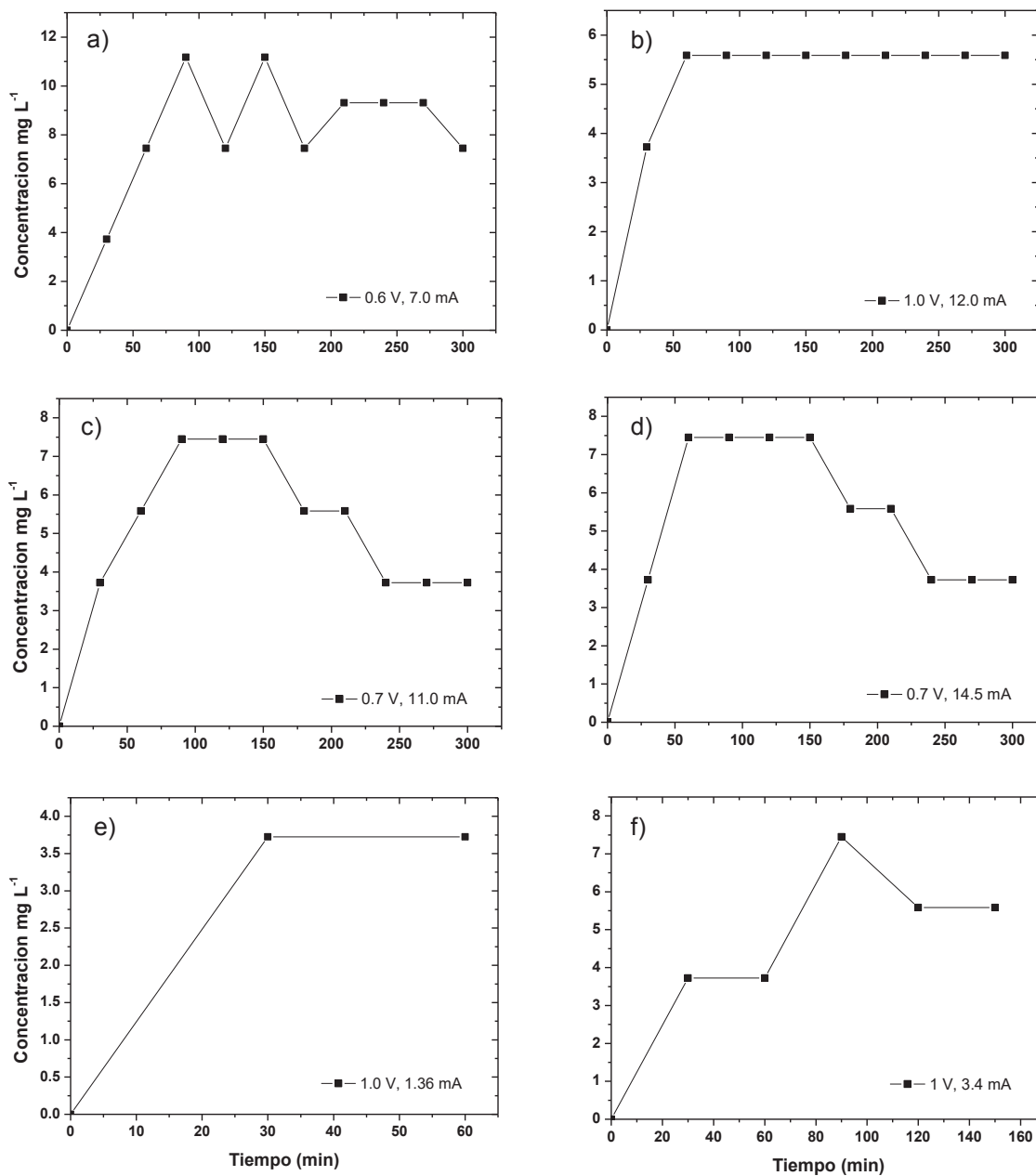
GENERACIÓN DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> EN MEDIO ÁCIDO (HNO<sub>3</sub>)



Área del electrodo de trabajo  $3.996 \text{ cm}^2$ .

ELABORADO POR: Wilber Guamán

## GENERACIÓN DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> EN MEDIO NEUTRO (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

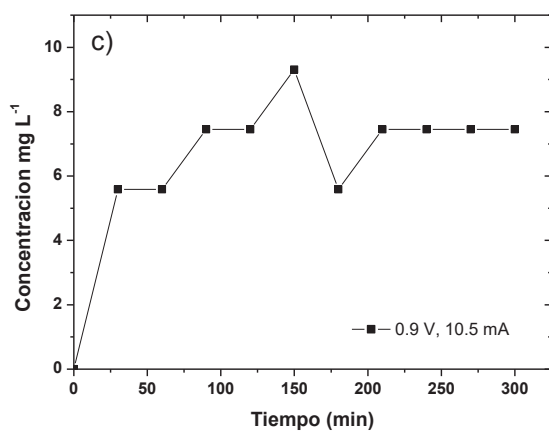
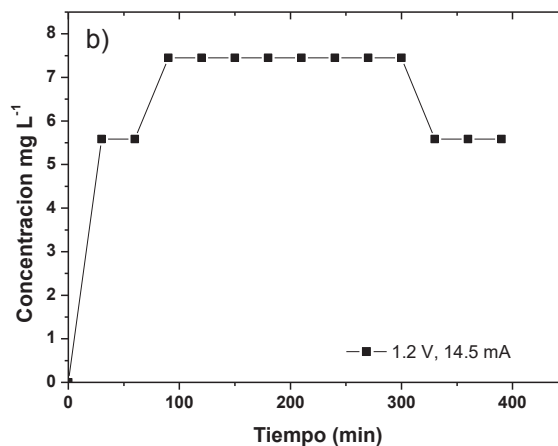
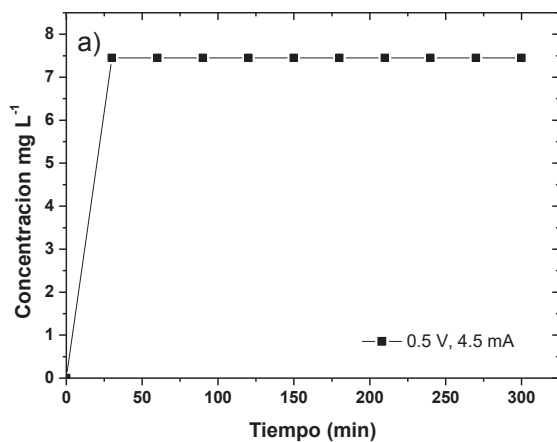


Notas:

- Todos los potenciales son medidos con un electrodo de referencia de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl).
- Área del electrodo de trabajo 3.996 cm<sup>2</sup>.

ELABORADO POR: Wilber Guamán

## GENERACIÓN DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> EN MEDIO ALCALINO

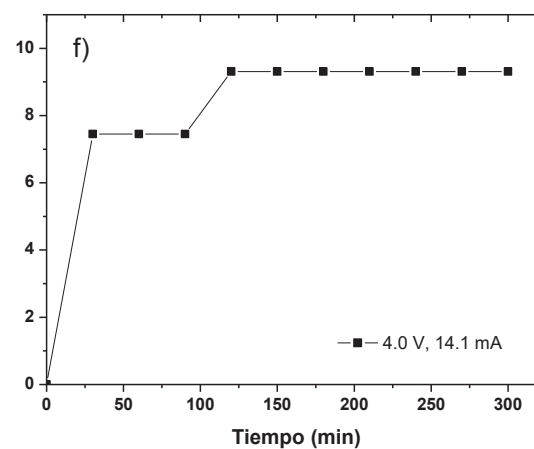
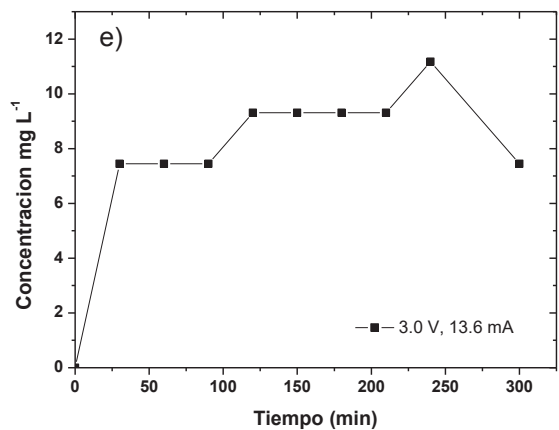
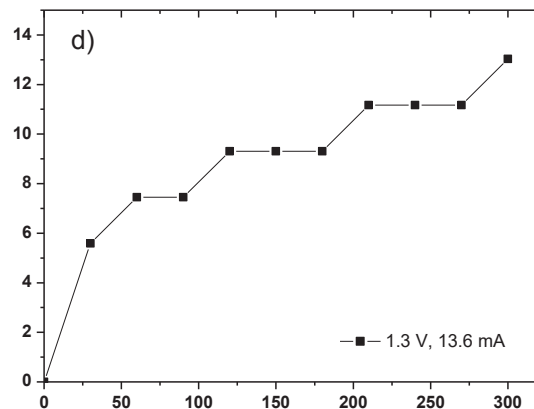
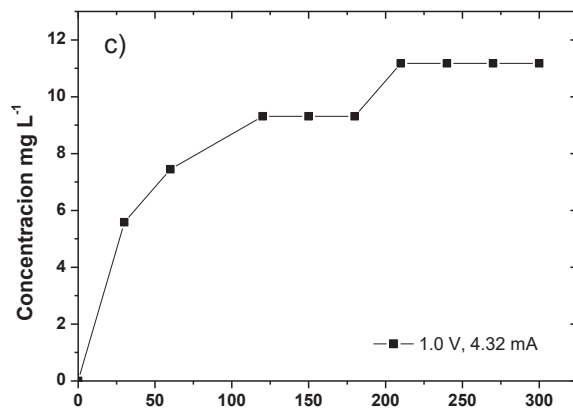
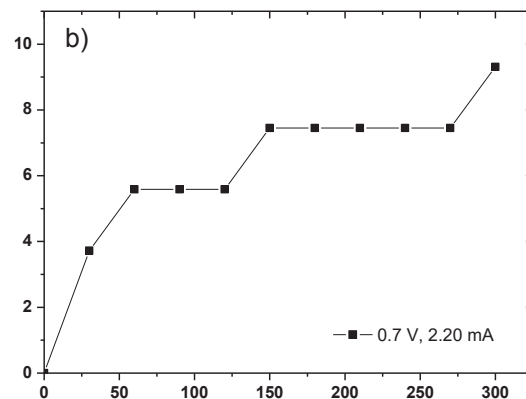
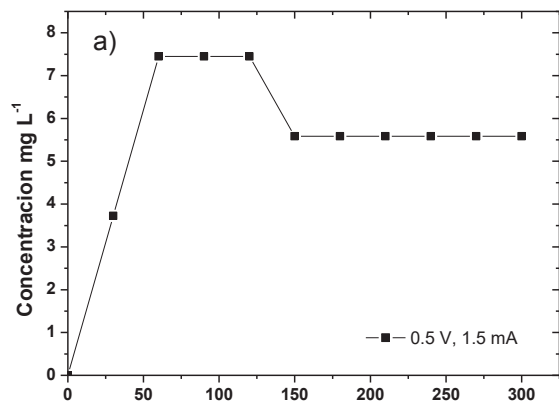


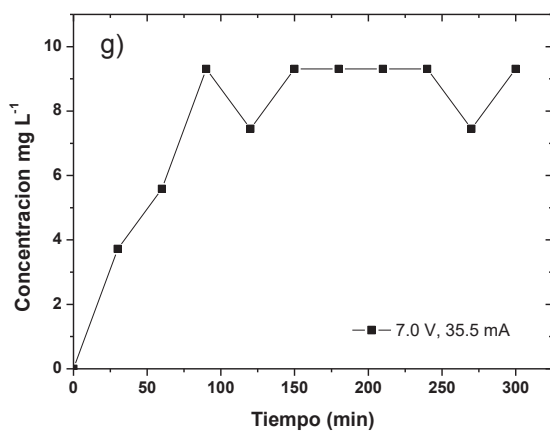
Notas:

- Todos los potenciales son medidos con un electrodo de referencia de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl).
- Área del electrodo de trabajo 3.996 cm<sup>2</sup>.

ELABORADO POR: Wilber Guamán



GENERACIÓN DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> EN AGUA NO TRATADA



Notas:

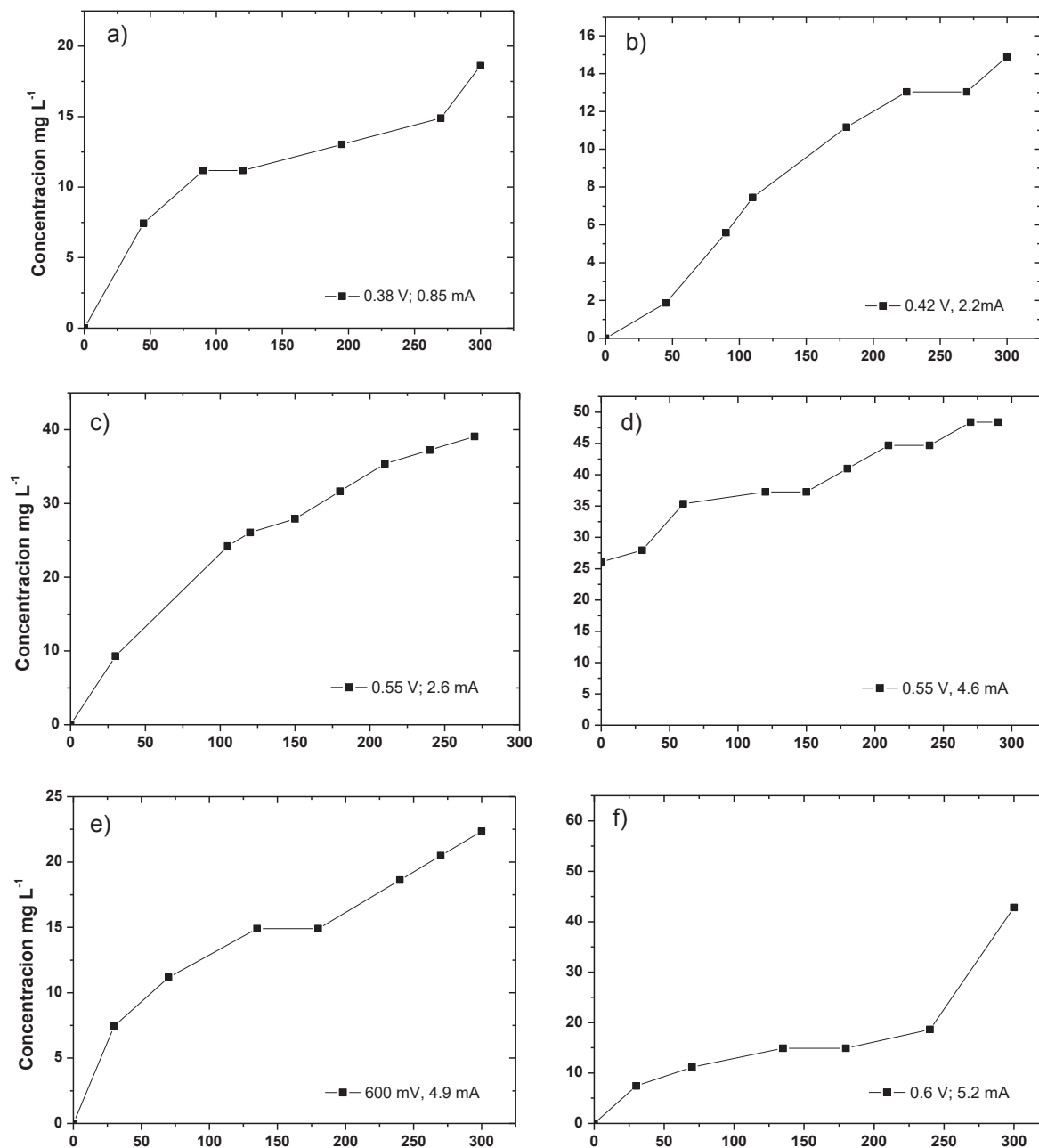
- Todos los potenciales son medidos con un electrodo de referencia de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl).
- Área del electrodo de trabajo 3.996 cm<sup>2</sup>.

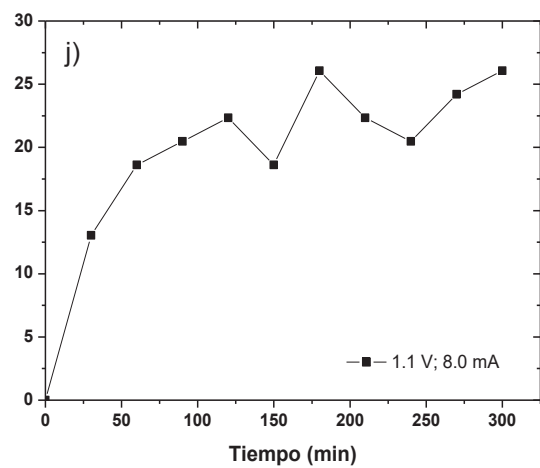
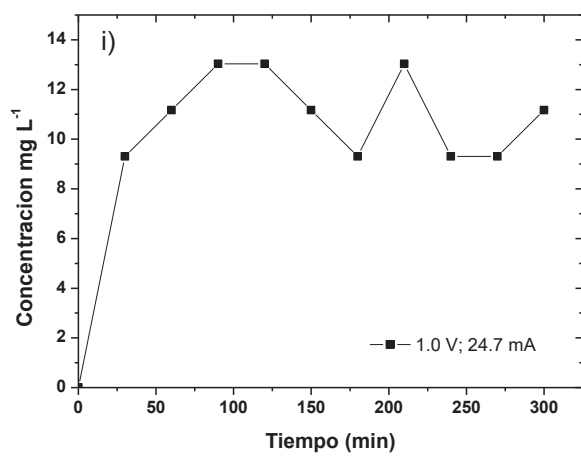
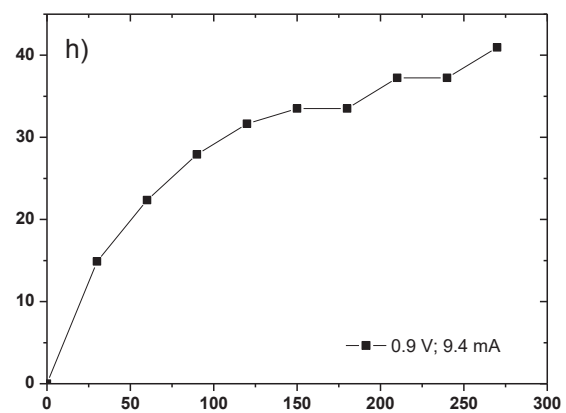
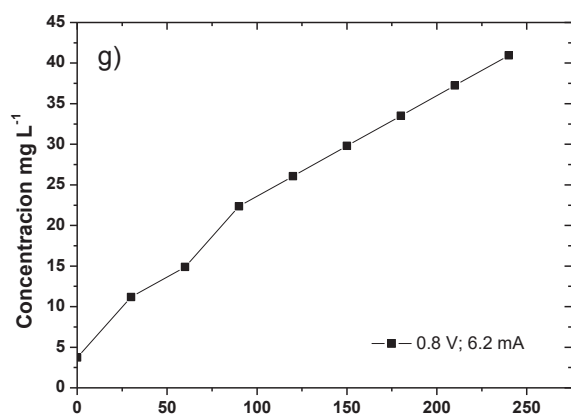
ELABORADO POR: Wilber Guamán

**ANEXO No 7**

**GENERACIÓN DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

**EN CELDA TIPO H**

GENERACIÓN DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> EN CELDA TIPO H



Notas:

- Todos los potenciales son medidos con un electrodo de referencia de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl).
- Área del electrodo de trabajo 3.996 cm<sup>2</sup>.

ELABORADO POR: Wilber Guamán